

Análise de sistemas de arrefecimento radiativo, um contributo para a obtenção de edifícios nZEB

Karla Isabel Freitas Gonçalves

Relatório de Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Luís Alexandre

Coorientador: Eng. Alexandre J. Freire



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho 2013

*Se alguém pensa que tem
adquirido conhecimento de algo,
ele ainda não o conhece como
devia conhecer.*

1 Coríntios 8:2

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a análise de um sistema do tipo passivo para apoio no arrefecimento de um edifício, como forma de minimizar os consumos energéticos de uma bomba de calor convencional. Este sistema é composto por um painel fotovoltaico térmico e um tanque de inércia, o qual absorve a energia em excesso da habitação. O sistema, durante a noite, força a passagem da água através do painel fotovoltaico com o intuito de dissipar a energia, recorrendo aos efeitos naturais radiativos e convectivos do ambiente exterior. Desta forma, aproveita-se o efeito noturno do céu, e do ar exterior, por se encontrarem a temperaturas inferiores à da água para promover a dissipação da energia armazenada durante o dia.

Para analisar todo o processo e avaliar o seu desempenho, foi criado um modelo matemático e físico do sistema para se efetuar a simulação dos equipamentos em condições reais de funcionamento, tendo sido a simulação dinâmica realizada no TRNSYS. Este modelo foi implementado num edifício com características de envolvente típicas da construção portuguesa, e de acordo com o recomendado no regulamento nacional, tendo sido a habitação exposta ao clima mediterrânico português - seco e de baixa precipitação.

Inicialmente a análise foi realizada com o objetivo de avaliar o comportamento térmico do edifício sem qualquer sistema de climatização, tendo sido determinadas as suas necessidades térmicas de arrefecimento. Com recurso ao modelo e programa de simulação, foram avaliados os benefícios deste novo sistema passivo integrado no edifício, com o intuito de determinar a redução do consumo energético face a um sistema convencional. Finalmente, foi efetuada uma análise paramétrica com o intuito de otimizar os diferentes parâmetros do novo conjunto de sistemas integrados (sistema radiativo e o convencional).

De uma forma geral, verificou-se uma redução de aproximadamente 18% da utilização de energia referente ao arrefecimento ambiente do espaço, tendo dissipado para o céu globalmente, em média, 36 W/m^2 no período de arrefecimento.

Não esquecer que este sistema permite a obtenção de energia elétrica através do fotovoltaico, possibilitando ainda um apoio ao AQS durante os períodos diurnos em que o sistema evaporativo/radiativo não está em fase de dissipação.

Globalmente, no que diz respeito às necessidades líquidas de energia primária, estas atingem o valor nulo (ZEB) com este novo sistema híbrido, passivo/ativo. Por outro lado se o edifício apenas possuir o sistema convencional a energia primária atinge o valor de $133 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$.

Radiative cooling system analysis, a contribute for nZEB buildings

Abstract

This work is focused on the analyses of a passive system to support a building cooling system, in order to minimize the electric consumption of a heat pump. This system consists in a thermal photovoltaic panel and an inertia tank, which absorbs the excess heat from the house. At night, the system forces the water to pass through the photovoltaic panel in order to cool down, using the radiative and convective natural effect. This system takes advantage of the sky nocturnal effect and the outside air, since they are at lower temperatures than the water, in order to promote the dissipation of the heat stored.

To examine all the process and evaluate the system performance was developed a mathematical and physical model of the system to perform a simulation of the equipment in actual operating conditions, being the dynamic simulation performed in TRNSYS. This was implemented in a building with typical Portuguese features, recommended in national regulation, being exposed to the Mediterranean climate - dry and low rainfall.

Initially the analysis was performed with the aim of evaluate the building thermal behavior without any air conditioning system and it was determined its thermal cooling needs. Using the model and simulation program, was evaluated the benefits of introducing this new passive system on the building, in order to obtain the reduction of the energy consumption compared to a conventional system. It was performed a parametric analysis in order to optimize the different parameters of the new integrated system (radiative cooling and conventional).

As a result there was 18% decrease in the cooling energy consumption, having a dissipative power of 36 W/m^2 . Through this it is possible to obtain electric and thermal energy, as a backup to the building energy needs.

With this new system (passive plus conventional) the primary energy use was $0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, reaching a net Zero Energy Building. When the building has only the conventional system, without the photovoltaic backup, the net primary energy need is $133 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$.

Agradecimentos

Quero agradecer profundamente aos meus pais e irmãos pelo apoio prestado durante o meu percurso académico, e pela paciência.

Agradeço ao meu namorado, José Jacinto, por me ter ajudado na fase inicial do desenvolvimento do modelo, e pela motivação.

Um obrigado em particular ao Eng. José Luís Alexandre pela sua paciência e acompanhamento neste último ano do meu percurso.

Ao Eng. Alexandre J. Freire um obrigado pelo apoio no desenvolvimento da tese.

À minha grande amiga Diana Raquel pela paciência que teve durante estes últimos 5 anos, onde pude ver a sua compreensão e amizade.

Por fim, obrigado a todos aqueles que me apoiaram durante o meu percurso académico.

Abreviaturas

AQS	Águas Quentes Sanitárias
ATES	Aquifer Thermal Energy Storage
BC	Bomba de Calor
CO ₂	Dióxido de carbono
COP	Coeficiente de desempenho
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ER	Energia proveniente de fontes Renováveis
FR	Fontes Renováveis
MPCM	Microencapsulation Phase Change Material
nZEB	nearly (net) Zero Energy Building
PCM	Phase Change Material
PPD	Porcentagem de Pessoas Descontentes
PTL	Ponte Térmica Linear
PV	Coletor fotovoltaico
PVF	PolyVinyl-Fluoride
PVT	Coletor fotovoltaico térmico
RCCTE	Reglamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RCESE	Reglamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SWH	Solar Water Heater
UV	Ultra violeta
ZEB	(net) Zero Energy Building

Nomenclatura

Carateres romanos

A	Área	m^2
B	Dimensão característica da ponte térmica linear	m
C	Correção	-
Cp	Calor específico	J/kg.°C
D	Diâmetro	m
E	Energia líquida	Wh
e	Espessura	m
F	Fator	-
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
g_{\perp}	Fator solar do envidraçado	-
H	Hora	h
h	Elevação	m
l	Largura	m
\dot{m}	Caudal mássico	kg/s
N	Número	-
p	Pressão	atm
P	Potência	W
Per	Perímetro	m
\dot{Q}	Calor	W
R	Constante de gases perfeitos	J/kg. °C
Rad	Radiação	$J/s.m^2$
Res	Resistência térmica	$m^2. °C/W$
T	Temperatura	°C
t	Tempo	s
U	Coefficiente global de transferência de calor	$W/m^2. °C$
V	Velocidade	m/s
Vol	Volume	m^3
W	Espaçamento entre os tubos	m

Carateres gregos

β	Inclinação do coletor	°
Δ	Variação	-
ε	Emissividade	-
η	Eficiência	-
λ	Condutibilidade térmica	$W/m.°C$
ρ	Densidade mássica	kg/m^3
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2.K^4$
Υ	Indica se a bomba funciona ou não	-
ψ	Coefficiente de transmissão térmica linear	$W/m.K$

Subscrito

∞	Ambiente
alh	Alheta
b	Bomba
céu	Céu com as propriedades reais
cl	Céu limpo
conv	Convecção
cover	Nebulosidade
Dif,H	Difusa na horizontal
down	Baixo
ed	Edifício
env	Envidraçado
eq	Equivalente
f	Fluido
fx	Fluxo
Glob,H	Total na horizontal
ho	Nível do mar
i	Inicial
in	Entrada
inf	Inferior
int	Interior
iso	Isolamento
j	Um dado ponto/valor
k	Klein
lat	Lateral
m	Média
ori	Orientação
out	Saída
p	Placa
ps	Proteção solar
pvt	Coletor fotovoltaico térmico
R	Remoção de calor
rad	Radiação
res	Reservatório
se	Superfície exterior
si	Superfície interior
t	Topo
tot	Total
u	Útil
up	Cima
v	Cobertura de vidro
w	Vento
wb	Wet Bulb - orvalho

Índice de conteúdos

Índice de figuras	xvii
Índice de tabelas	xxi
1. Introdução	3
1.1. Enquadramento introdutório	3
1.1.1 Energia em Portugal	3
1.1.2 Sistemas e aplicações	5
1.2. Estudo do céu noturno e elementos emissores.....	6
1.2.1. Estudo de sistemas radiativos noturnos	8
Elementos emissores	9
Meios de armazenamento térmico	12
Vantagens e desvantagens.....	13
1.3. nZEB	13
1.4. Objetivos	15
1.5. Estrutura.....	15
2. Modelação matemática do sistema.....	19
2.1. Descrição do sistema	19
2.1.1. PVT	19
2.1.2. Reservatório	20
2.1.3. Dados climáticos	20
2.2. Modelação do sistema.....	20
2.2.1. PV-térmico	20
2.2.2. Reservatório	22
2.2.3. Bomba	24
2.2.4. Simplificações	25
2.3. Temperatura e nebulosidade do céu noturno	25
2.3.1. Nebulosidade.....	25
2.3.2. Emissividade	25
2.3.3. Temperatura	26
2.4. Modelação no TRNSYS	26
3. Caraterização do caso de estudo	31
3.1. Características do edifício.....	31
3.2. Perfis de utilização.....	31
3.3. Envolvente exterior.....	32

3.4.	Simplificações	32
3.5.	Comportamento térmico	32
3.6.	Comportamento energético	34
3.7.	Caraterização de funcionamento do sistema híbrido.....	35
4.	Estudo paramétrico	39
4.1.	Período de funcionamento.....	39
4.1.1.	Set-point.....	39
4.1.2.	Horário de funcionamento	41
4.2.	Área útil do elemento dissipativo.....	42
4.3.	Otimização.....	44
4.3.1.	Caudal de fluido.....	44
4.3.2.	Percentagem de glicol no fluido	46
4.3.3.	Tipo de ligação entre os coletores	47
4.3.4.	Inclinação do PVT	50
4.3.5.	Volume do reservatório	51
4.3.6.	Meio envolvente do reservatório	53
4.4.	Sistema otimizado	55
4.4.1.	Resultados.....	55
4.4.2.	Sistema teórico – sem proteção de vidro	57
5.	Conclusões e trabalhos futuros	63
5.1.	Conclusões.....	63
5.2.	Trabalhos futuros.....	65
6.	Referências	69
7.	Anexos.....	75
I.	nZEB e ZEB	75
II.	Cálculos auxiliares ao modelo	76
	Equações de Klein.....	76
	Fator de remoção de calor	76
	Pressão atmosférica.....	77
III.	Características do painel fotovoltaico	78
IV.	Modelação no TRNSYS	80
V.	Consumos elétricos médios.....	82
VI.	Ganhos internos.....	82
VII.	Envolvente exterior	83

Opaca vertical	83
Contato com o solo	84
Cobertura exterior	85
Pontes térmicas lineares	86
Envidraçados	86
Inércia	87
VIII. Comportamento energético	88
IX. Otimização	91
Área útil do elemento dissipativo	91
Porcentagem de glicol no fluido	91
Volume do reservatório	92
Dimensões do reservatório	92
Efeito convectivo e radiativo	93
X. Sistema otimizado	95
Área inferior (25 m ²)	97

Índice de figuras

FIGURA 1.1 – CONSUMO NO SECTOR DOMÉSTICO (TEP) E PESO (%) DO CONSUMO DO SECTOR DOMÉSTICO NO CONSUMO FINAL DE ENERGIA (1989-2009) EM POTUGAL. [2]	3
FIGURA 1.2 – DISTRIBUIÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA NO ALOJAMENTO POR TIPO DE USO (2010). [2]	4
FIGURA 1.3 – DISTRIBUIÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA NO ALOJAMENTO, POR TIPO DE USO E FONTE DE ENERGIA (2010). [2]	4
FIGURA 1.4 – REPARTIÇÃO DA ENERGIA COMERCIALIZADA PELA EDP EM 2011. [4]	5
FIGURA 1.5 – ESQUEMA DE DIFERENTES FORMAS DE ARREFECER UM EDIFÍCIO COM ESTRATÉGIAS PASSIVAS [1].	5
FIGURA 1.6 – ESQUEMATIZAÇÃO DE UMA DAS PRIMEIRAS APLICAÇÕES DO SISTEMA DE ARREFECIMENTO RADIATIVO INCORPORADO COM VENTILAÇÃO NOTURNA. [1]	6
FIGURA 1.7 – ESQUEMATIZAÇÃO DE UMA DAS PRIMEIRAS APLICAÇÕES DA ÁGUA COMO ARMAZENADOR TÉRMICO. [1]	7
FIGURA 1.8 – ESQUEMATIZAÇÃO DO ARREFECIMENTO RADIATIVO E EVAPORATIVO. [1]	8
FIGURA 1.9 – EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO IMEDIATA DO ARREFECIMENTO RADIATIVO UTILIZANDO AR. [13]	9
FIGURA 1.10 – ESPECTRO DE ABSORÇÃO/EMISSIVIDADE DE UM COLETOR SOLAR TÉRMICO. [20]	10
FIGURA 1.11 – ESQUEMATIZAÇÃO DE UM COLETOR FOTOVOLTAICO TÉRMICO SEM COBERTURA DE VIDRO (A) E COM COBERTURA (B). [11]	10
FIGURA 1.12 – ESQUEMATIZAÇÃO DA CHAPA COM A SERPENTINA COLADA	11
FIGURA 1.13 – REFLETIVIDADE E EMISSIVIDADE (ABSORVIDADE) DO PVF PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA. [23]	11
FIGURA 1.14 – TRANSPARÊNCIA DO POLIETILENO PARA DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA. [23]	12
FIGURA 1.15 – ESQUEMATIZAÇÃO DO SISTEMA COM DOIS RESERVATÓRIOS. [27]	12
FIGURA 1.16 – DEFINIÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM NZEB. [29]	13
FIGURA 1.17 – ESQUEMATIZAÇÃO DOS LIMITES DOS NZEB SEGUNDO A EPBD. [29]	14
FIGURA 2.1 – ESQUEMATIZAÇÃO DO SISTEMA EM ANÁLISE.	19
FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PVT.	20
FIGURA 2.3 – DISTRIBUIÇÃO NODAL DO RESERVATÓRIO. [40]	23
FIGURA 2.4 – ESQUEMATIZAÇÃO DO FLUXO MÁSSICO ENTRE OS NÓS. [41]	23
FIGURA 2.5 – BALANÇO ENERGÉTICO DO RESERVATÓRIO. [41]	23
FIGURA 3.1 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DO ANO E RESPECTIVO LIMITE MÁXIMO REGULAMENTAR	33
FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE TEMPERATURAS SUPERIORES AO LIMITE E QUANTIFICAÇÃO DA DIFERENÇA MÉDIA MENSAL NO PERÍODO EM QUE O EDIFÍCIO SE ENCONTRA OCUPADO.	33
FIGURA 3.3 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DO ANO E RESPECTIVO LIMITE REGULAMENTAR (SEM CONTABILIZAR O EFEITO DO AQUECIMENTO AMBIENTE).	34
FIGURA 4.1 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DOS LIMITES REGULAMENTARES AO LONGO DO ANO.	39
FIGURA 4.2 – VALOR MÉDIO MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO TANQUE NO FIM DE UM DIA DE TRABALHO.	40
FIGURA 4.3 – POTÊNCIA MÉDIA ANUAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA	40
FIGURA 4.4 – ENERGIA MÉDIA ABSORVIDA DO EDIFÍCIO PELO SISTEMA PASSIVO	41
FIGURA 4.5 – VALOR MÉDIO MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO TANQUE NO FIM DE UM DIA DE TRABALHO.	41
FIGURA 4.6 – POTÊNCIA MÉDIA ANUAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA	41
FIGURA 4.7 – VALOR MÉDIO MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO TANQUE NO FIM DE UM DIA DE TRABALHO.	42
FIGURA 4.8 – POTÊNCIA MÉDIA ANUAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA	43
FIGURA 4.9 – ENERGIA TÉRMICA ABSORVIDA PELO SISTEMA PASSIVO E CONVENCIONAL	43

FIGURA 4.10 – POTÊNCIA MÉDIA ANUAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA PARA DIFERENTES CAUDAIS DE CIRCULAÇÃO.	44
FIGURA 4.11 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO TANQUE PARA DIFERENTES CAUDAIS DE CIRCULAÇÃO EM CADA PVT APÓS UM DIA DE TRABALHO.	44
FIGURA 4.12 – ENERGIA MÉDIA MENSAL ABSORVIDA PELO SISTEMA AUXILIAR CONFORME O CAUDAL DE CIRCULAÇÃO NO PVT.	45
FIGURA 4.13 – ENERGIA ANUAL UTILIZADA PELAS BOMBAS DE CIRCULAÇÃO E SISTEMA AUXILIAR.	45
FIGURA 4.14 – ENERGIA TÉRMICA ABSORVIDA PELO SISTEMA PASSIVO E CONVENCIONAL.	45
FIGURA 4.15 – POTÊNCIA MÉDIA ANUAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE GLICOL.	46
FIGURA 4.16 – ENERGIA TÉRMICA ABSORVIDA PELO SISTEMA PASSIVO E CONVENCIONAL.	47
FIGURA 4.17 – ESQUEMATIZAÇÃO DE COLETORES SOLARES LIGADOS EM SÉRIE. [54].....	47
FIGURA 4.18 – ESQUEMATIZAÇÃO DE COLETORES SOLARES LIGADOS EM PARALELO. [54].....	48
FIGURA 4.19 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO TANQUE NO FIM DE UM DIA DE TRABALHO.	48
FIGURA 4.20 – POTÊNCIA MÉDIA MENSAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA.	48
FIGURA 4.21 – ENERGIA TÉRMICA UTILIZADA PARA A CLIMATIZAÇÃO DO EDIFÍCIO.	49
FIGURA 4.22 – ENERGIA ELÉTRICA CONSUMIDA PELO SISTEMA CONVENCIONAL, PELAS BOMBAS DE CIRCULAÇÃO E PELO AUXILIAR DE AQS NUM ANO.	49
FIGURA 4.23 – DIFERENÇA DA POTÊNCIA MÉDIA POR UNIDADE DE ÁREA.	50
FIGURA 4.24 – DIFERENÇA DA TEMPERATURA MÉDIA DO RESERVATÓRIO.	50
FIGURA 4.25 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DIVERSOS CONSUMOS ENERGÉTICOS MÉDIOS ANUAIS.	51
FIGURA 4.26 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO TANQUE NO FIM DE UM DIA DE TRABALHO.	52
FIGURA 4.27 – ENERGIA TÉRMICA ABSORVIDA PELO SISTEMA PASSIVO E CONVENCIONAL.	52
FIGURA 4.28 – ENERGIA ELÉTRICA UTILIZADA NUM ANO PELO CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS DE CIRCULAÇÃO.	52
FIGURA 4.29 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO FLUIDO DO RESERVATÓRIO NO FIM E UM DIA DE TRABALHO.	53
FIGURA 4.30 – POTÊNCIA MÉDIA MENSAL DISSIPADA PELOS COLETORES PVT POR UNIDADE DE ÁREA.	54
FIGURA 4.31 – ENERGIA MÉDIA MENSAL ABSORVIDA PELO SISTEMA CONVENCIONAL.	54
FIGURA 4.32 – POTÊNCIA MÁXIMA, MÍNIMA E MÉDIA MENSAL DISSIPADA PELO PVT.	55
FIGURA 4.33 – TEMPERATURA MÁXIMA, MÍNIMA E MÉDIA MENSAL DISSIPADA PELO PVT.	56
FIGURA 4.34 – ENERGIA MÉDIA MENSAL ABSORVIDA DO EDIFÍCIO PELO SISTEMA PASSIVO E CONVENCIONAL DE CLIMATIZAÇÃO.	56
FIGURA 4.35 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DA TEMPERATURA MÉDIA DO RESERVATÓRIO.	57
FIGURA 4.36 – POTÊNCIA MÉDIA MENSAL DISSIPADA PELOS COLETORES PVT POR UNIDADE DE ÁREA.	58
FIGURA 4.37 – ENERGIA MÉDIA MENSAL ABSORVIDA PELO SISTEMA AUXILIAR.	58
FIGURA 4.38 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO BALANÇO PERCENTUAL DE ENERGIA ELÉTRICA DO EDIFÍCIO, CONSIDERANDO OS DIVERSOS CONSUMOS.	59
FIGURA 7.1 – RELAÇÃO ENTRE A PROCURA E A OBTENÇÃO SE ENERGIA DE FONTES RENOVÁVEIS DE UM ZEB E O LIMITE INFERIOR DO NZEB. [55]	75
FIGURA 7.2 – QUALIFICAÇÃO ENERGÉTICA DOS EDIFÍCIOS. [56]	75
FIGURA 7.3 – ESQUEMATIZAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE O TUBO E A PLACA DO COLETOR FOTOVOLTAICO. [37]...	77
FIGURA 7.4 – CATÁLOGO COM AS PROPRIEDADES ESCOLHIDAS PARA O COLETOR FOTOVOLTAICO.	78
FIGURA 7.5 – DIMENSÕES DO COLETOR FOTOVOLTAICO EM ANÁLISE E PORMENORES. [51]	79
FIGURA 7.6 – REPRESENTAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE OS BLOCOS MAIS IMPORTANTES DO TRNSYS.....	80
FIGURA 7.7 – REPRESENTAÇÃO DOS GRUPOS DE MÓDULOS NO TRNSYS.....	80

FIGURA 7.8 – REPRESENTAÇÃO DOS DIVERSOS PERFIS: DE ILUMINAÇÃO, EQUIPAMENTOS E OCUPAÇÃO, DE SEGUNDA A SEXTA-FEIRA.	82
FIGURA 7.9 – REPRESENTAÇÃO DOS DIVERSOS PERFIS: DE ILUMINAÇÃO, EQUIPAMENTOS E OCUPAÇÃO, DURANTE O SÁBADO E O DOMINGO.	82
FIGURA 7.10 – ESQUEMATIZAÇÃO DA ENVOLVENTE VERTICAL. [59].....	83
FIGURA 7.11 – ESQUEMATIZAÇÃO DO PAVIMENTO EM CONTATO COM O SOLO.	84
FIGURA 7.12 – ESQUEMATIZAÇÃO DA COBERTURA EXTERIOR.	85
FIGURA 7.13 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE ABRIL.	88
FIGURA 7.14 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE MAIO.	88
FIGURA 7.15 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE JUNHO.....	88
FIGURA 7.16 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE JULHO.	89
FIGURA 7.17 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE AGOSTO.	89
FIGURA 7.18 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE SETEMBRO.	89
FIGURA 7.19 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELO SISTEMA DURANTE O MÊS DE OUTUBRO.	90
FIGURA 7.20 – POTÊNCIA DISSIPADA MÉDIA MENSAL PELO ELEMENTO RADIATIVO.	91
FIGURA 7.21 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO RESERVATÓRIO NO INÍCIO DA NOITE.	91
FIGURA 7.22 – POTÊNCIA MÉDIA MENSAL DISSIPADA POR UNIDADE DE ÁREA.	92
FIGURA 7.23 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO FLUIDO DO RESERVATÓRIO NO FIM DE UM DIA DE TRABALHO.	93
FIGURA 7.24 – POTÊNCIA MÉDIA MENSAL DISSIPADA PELOS COLETORES PVT POR UNIDADE DE ÁREA.	93
FIGURA 7.25 – ENERGIA MÉDIA MENSAL ABSORVIDA PELO SISTEMA CONVENCIONAL.	94
FIGURA 7.26 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE ABRIL.	95
FIGURA 7.27 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE MAIO.	95
FIGURA 7.28 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE JUNHO.....	95
FIGURA 7.29 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE JULHO.	96
FIGURA 7.30 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE AGOSTO.	96
FIGURA 7.31 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE SETEMBRO.	96
FIGURA 7.32 – TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA AMBIENTE E NO INTERIOR DO EDIFÍCIO, E ENERGIA MÉDIA DIÁRIA ABSORVIDA PELOS SISTEMAS DURANTE O MÊS DE OUTUBRO.	97

Índice de tabelas

TABELA 2.1 – CONDIÇÕES DE ANÁLISE DO PVT.	19
TABELA 2.2 – CONDIÇÕES DE ANÁLISE DO RESERVATÓRIO.	20
TABELA 2.3 – PROPRIEDADES DA BOMBA UTILIZADA. [44].....	24
TABELA 3.1 – RESUMO DOS COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DA ENVOLVENTE DO EDIFÍCIO E OS RESPECTIVOS LIMITES. [35].....	32
TABELA 3.2 – NECESSIDADES ENERGÉTICAS E ELÉTRICAS DO EDIFÍCIO [kWh/ANO].	34
TABELA 3.3 – PARÂMETROS PARA O INÍCIO DA OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA.	36
TABELA 4.1 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	40
TABELA 4.2 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	42
TABELA 4.3 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS, E ENERGIA OBTIDA PELOS COLETORES [kWh/ANO].	43
TABELA 4.4 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	46
TABELA 4.5 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	47
TABELA 4.6 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	49
TABELA 4.7 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA AUXILIAR E PELAS BOMBAS, E O EXCESSO DE ENERGIA [kWh/ANO].	51
TABELA 4.8 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	53
TABELA 4.9 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	54
TABELA 4.10 – PARÂMETROS PARA A OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA.	55
TABELA 4.11 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL, PELAS BOMBAS E AUXILIAR DE AQS [kWh/ANO].	56
TABELA 4.12 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL, PELAS BOMBAS E AUXILIAR DE AQS E ENERGIA OBTIDA PELOS COLETORES [kWh/ANO].	58
TABELA 5.1 – RESUMO DAS POTÊNCIAS OBTIDAS EM ALGUMAS EXPERIÊNCIAS REALIZADAS.	63
TABELA 7.1 – ÁREAS RELEVANTES.	79
TABELA 7.2 – MÓDULOS DO TRNSYS QUE REPRESENTAM MATEMATICAMENTE O COMPONENTE REAL.	81
TABELA 7.3 – MODELAÇÃO MANUAL DOS CONTROLADORES DO SISTEMA RADIATIVO E DE ARREFECIMENTO. ...	81
TABELA 7.4 – MÓDULOS DO TRNSYS QUE SE DETERMINAM VALORES APROXIMADOS DA ENVOLVENTE.	81
TABELA 7.5 – CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA VERTICAL EXTERIOR. [58]	83
TABELA 7.6 – RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL DO ELEMENTO, E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA TOTAL. [35].....	83
TABELA 7.7 – CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA VERTICAL EXTERIOR. [58]	84
TABELA 7.8 – CONSTITUIÇÃO DA ENVOLVENTE OPACA VERTICAL EXTERIOR. [58]	85
TABELA 7.9 – RESISTÊNCIA TÉRMICA SUPERFICIAL DO ELEMENTO, E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA TOTAL. [35].....	85
TABELA 7.10 – RESUMO DAS PONTES TÉRMICAS LINEARES CONSIDERADAS PARA O EDIFÍCIO. [35]	86
TABELA 7.11 – FATOR SOLAR DO ENVIDRAÇADO SELECIONADO.	86
TABELA 7.12 – FATOR DE CORREÇÃO DO FATOR SOLAR DO ENVIDRAÇADO. [35].....	86
TABELA 7.13 – VALORES DE MASSA SUPERFICIAL ÚTIL E DE INÉRCIA.	87
TABELA 7.14 – PROPRIEDADES DE ÁGUA GLICOLADA COM DIFERENTES PERCENTAGENS DE GLICOL. [60]	91
TABELA 7.15 – VOLUME E ALTURA DOS RESERVATÓRIOS.	92
TABELA 7.16 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL E PELAS BOMBAS [kWh/ANO].	94
TABELA 7.17 – PARÂMETROS PARA A OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA PARA 25M ²	97
TABELA 7.18 – ENERGIA UTILIZADA PELO SISTEMA CONVENCIONAL, PELAS BOMBAS E AUXILIAR DE AQS [kWh/ANO].	97

Capítulo 1

Introdução

- *Apresentação de dados estatísticos referentes ao tipo de consumo elétrico no setor residencial português, assim como origem dessa eletricidade – página 3 até 5*
- *Enumeração de possíveis sistemas para instalar em habitações de modo a obter energia proveniente de fontes renováveis, nomeadamente para o arrefecimento – páginas 5 e 6*
- *Estudo do céu noturno, e estado da arte de sistemas passivos de arrefecimento radiativo – página 8 até 13*
- *Definição de edifício ZEB e nZEB – páginas 13 e 14*

1. Introdução

1.1. Enquadramento introdutório

A evolução da sociedade pode ser caracterizada por um comportamento consumista de energia, sustido através das fontes de energia fóssil. No entanto, este padrão de utilização energética tem gerado grandes preocupações a nível de qualidade ambiental. O desenvolvimento de novas tecnologias que permitam diversificar as fontes de energia, aproveitando os recursos ilimitados oferecidos pela natureza, pode ser considerado uma solução para tais preocupações, visto que não geram poluição na transformação de energia.

Ao aprofundar a possibilidade de generalização de sistemas que aproveitem as fontes renováveis de energia, verifica-se que o maior obstáculo para este desenvolvimento são os padrões comportamentais associados à visualização que o Homem tem dos edifícios. Visto que alguns podem associar a *redução de utilização energética* a incomodidades, privações e limitação de recursos.

Tendo como objetivo reduzir a dependência energética, no setor doméstico, sem recorrer a privações, os nZEB podem ser considerados uma meta a atingir, visto que se tratam de edifícios que reduzem a utilização excessiva e desperdícios de energia [1].

1.1.1 Energia em Portugal

A utilização de energia em Portugal, considerando apenas o setor residencial, tem aumentado ao longo dos anos. Na Figura 1.1 encontra-se a representação gráfica desta tendência, assim como o aumento percentual do consumo no setor residencial face ao total. Verifica-se assim que, apesar desta utilização de energia no setor doméstico, o seu peso relativo diminui, o que leva à conclusão que existe um aumento da energia utilizada nos diversos setores portugueses. Isto deve-se à evolução tecnológica, não apenas na área residencial mas, principalmente, na área industrial.

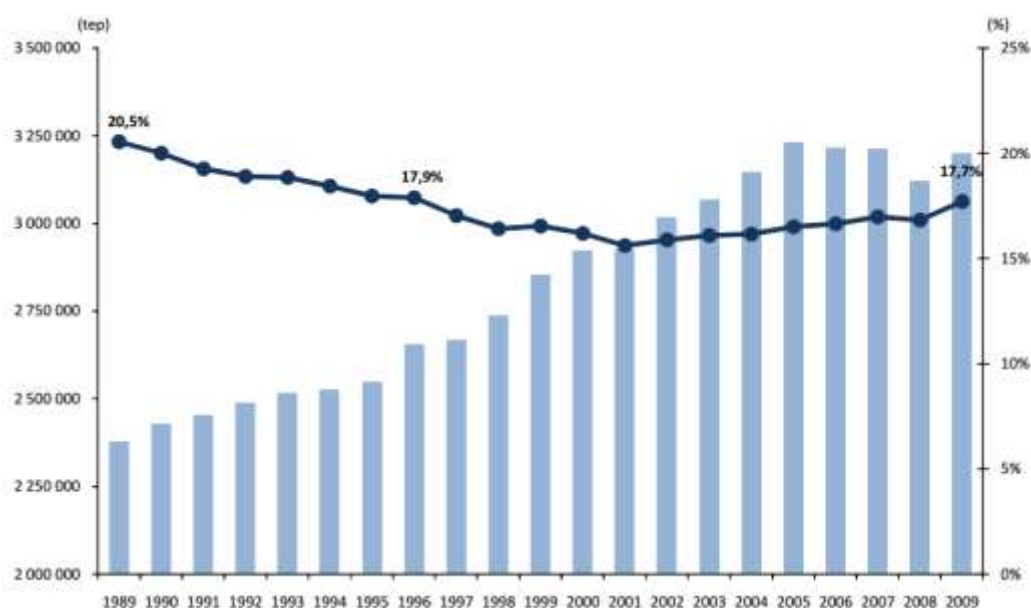


Figura 1.1 – Consumo no sector doméstico (tep) e peso (%) do consumo do sector doméstico no consumo final de energia (1989-2009) em Portugal. [2]

1. Introdução

Sendo o tema deste trabalho o arrefecimento ambiente, é interessante conhecer o peso da energia utilizada para este propósito em Portugal (aproximadamente 0,8% - Figura 1.2), assim como o tipo de energia. Para tal, recorre-se à Figura 1.3 onde se verifica que, para este fim, apenas se utiliza energia elétrica [2, 3].

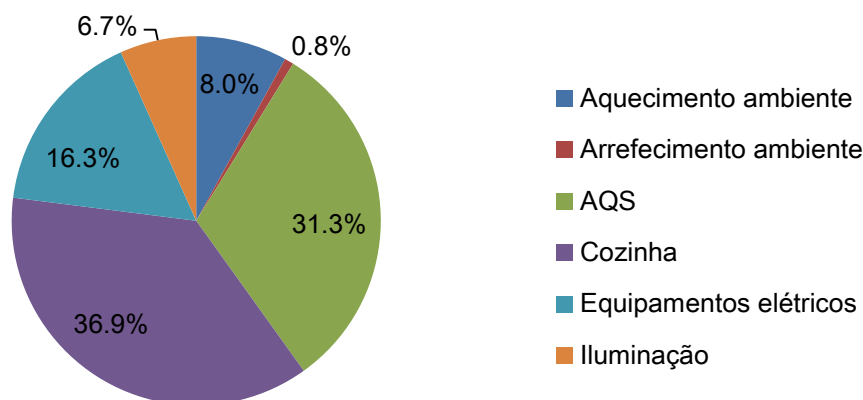


Figura 1.2 – Distribuição da utilização de energia no alojamento por tipo de uso (2010). [2]

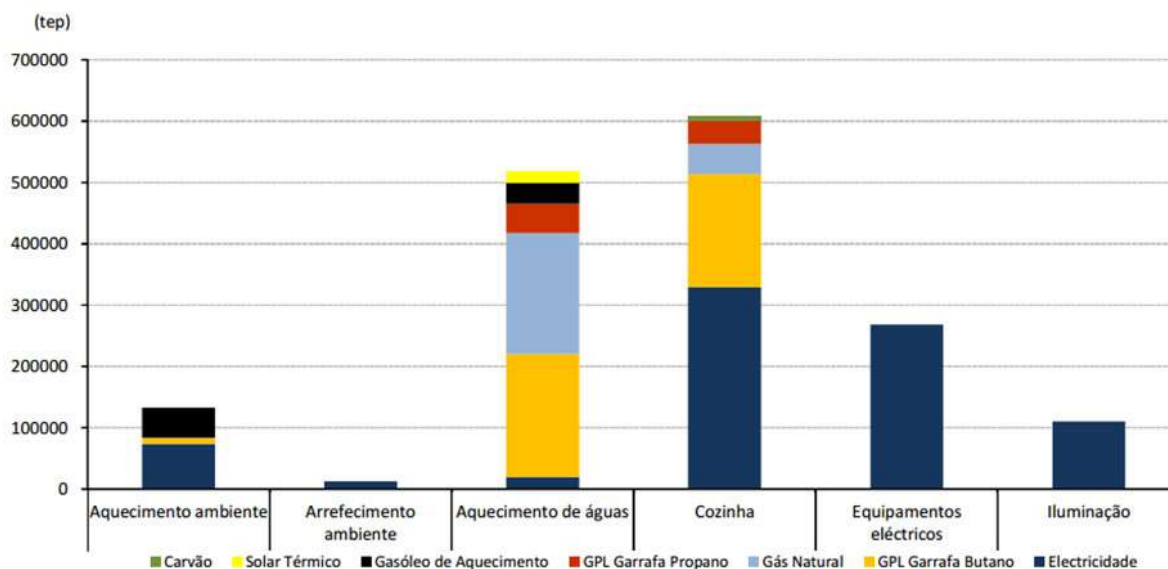


Figura 1.3 – Distribuição da utilização de energia no alojamento, por tipo de uso e fonte de energia (2010). [2]

Em complemento à figura anterior recorre-se à Figura 1.4, esta representa percentualmente a origem da energia elétrica em Portugal destinada ao setor doméstico. Verificando-se que cerca de 44% desta é proveniente de fontes convencionais (combustíveis fósseis).

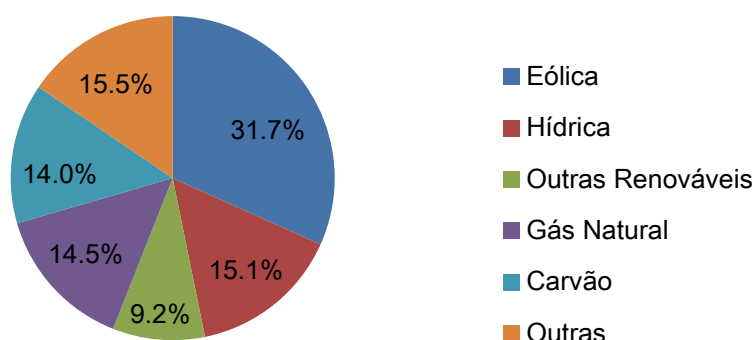


Figura 1.4 – Repartição da energia comercializada pela EDP em 2011.¹ [4]

1.1.2 Sistemas e aplicações

Um dos objetivos da regulamentação portuguesa (RCCTE e RSECE) é promover a obtenção de energia de fontes renováveis, através de sistemas instalados no próprio edifício. Algumas das instalações mais comuns são: coletores solares térmicos e/ou fotovoltaicos, mini hídricas, mini eólicas e instalações geotérmicas. Usualmente a energia procedente desses sistemas é aplicada para:

- AQS;
- Aquecimento ambiente;
- Produção de eletricidade – aplicada na iluminação, equipamentos elétricos, climatização, entre outros.

No entanto, existem novos pontos que podem ser tocados para tentar alcançar a independência energética. A Figura 1.5 representa um esquema com as diferentes possibilidades para atingir o conforto térmico no interior do edifício, através de diversos meios de arrefecimento, apostando em soluções passivas.

O meio envolvente pode prover soluções que previnam o sobreaquecimento e/ou promovam o arrefecimento, por exemplo, através do ecodesign, iluminação natural, processos radiativos, entre outros.

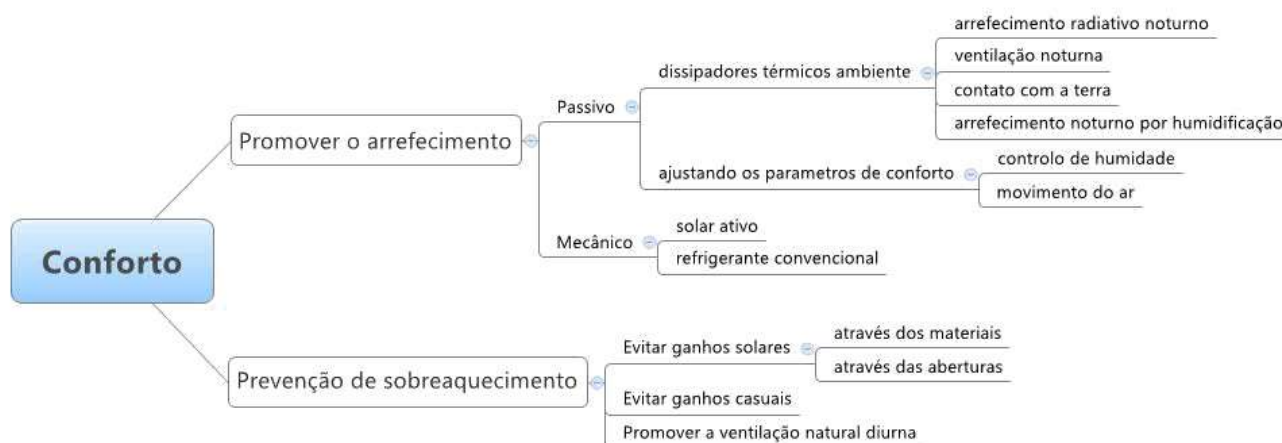


Figura 1.5 – Esquema de diferentes formas de arrefecer um edifício com estratégias passivas [1].

¹ ‘Outras’ inclui a cogeração, o fuelóleo e a nuclear

O sobreaquecimento pode estar associado ao aquecimento global, a micro climas urbanos, arquitetura do edifício e à forma como este é utilizado (por exemplo excesso de equipamentos elétricos) [5]. Por vezes evitar as causas do sobreaquecimento é impossível ou economicamente inviável, sendo então necessário optar por sistemas de climatização. Estes sistemas podem ser passivos, ou ativos (convencionais).

Os sistemas convencionais são tipicamente alimentados por energia elétrica e estão associados a uma utilização intensiva de energia. Em oposição, os sistemas passivos apoiam-se em diversas formas de energia, reduzindo assim a utilização de combustíveis fósseis. No entanto, os sistemas passivos podem não ser suficientes, apostando-se então numa solução híbrida, que agregue um sistema passivo a um convencional.

Este trabalho aprofunda o estudo de dissipadores térmicos para o ambiente (Figura 1.5), mais precisamente os radiativos. É avaliada a viabilidade do acoplamento deste tipo de sistema a um convencional (bomba de calor), tratando-se de uma solução que tem em vista reduzir o consumo de energia proveniente de fontes primárias. O objetivo é a implantação destes sistemas em edifícios residenciais para alcançar os requisitos de nZEB.

1.2. Estudo do céu noturno e elementos emissores

O arrefecimento radiativo através do céu noturno é um processo que pode ser utilizado para dissipar energia térmica. Através deste tipo de arrefecimento, a superfície exposta ao céu atinge temperaturas inferiores à temperatura ambiente [1]. No entanto, a potencialidade de um sistema radiante noturno depende do material utilizado e de alguns fatores climatéricos, tais como: temperatura ambiente, humidade relativa, velocidade do vento e nebulosidade [6].

O arrefecimento através da radiação para o céu noturno pode ser acoplado a um sistema que ajude a prevenir os ganhos solares durante o dia. Se o elemento dissipativo tiver uma cor clara, emissividade elevada a grandes comprimentos de onda e estiver sobre o telhado, durante o dia reflete a radiação visível (ganhos solares) e durante a noite promove as perdas de calor através de radiação infravermelha. [1]

Uma das primeiras aplicações para o aproveitamento do céu noturno como fonte fria foi conseguida através da ventilação noturna - Figura 1.6. O telhado arrefece através da radiação emitida para o céu (e convecção para o ambiente), e existe circulação forçada do ar exterior para o interior, sendo previamente arrefecido pelo contato com o telhado.



Figura 1.6 – Esquematização de uma das primeiras aplicações do sistema de arrefecimento radiativo incorporado com ventilação noturna. [1]

Uma outra aplicação envolve uma cobertura amovível que é removida durante a noite permitindo o arrefecimento do edifício [1, 7]. Devido à capacidade de armazenamento térmico da água, esta começou a ser utilizada nestes sistemas. Assim, foram incorporados uns sacos de água que arrefeciam durante a noite, e ao longo do dia absorviam o calor do interior do edifício - Figura 1.7.

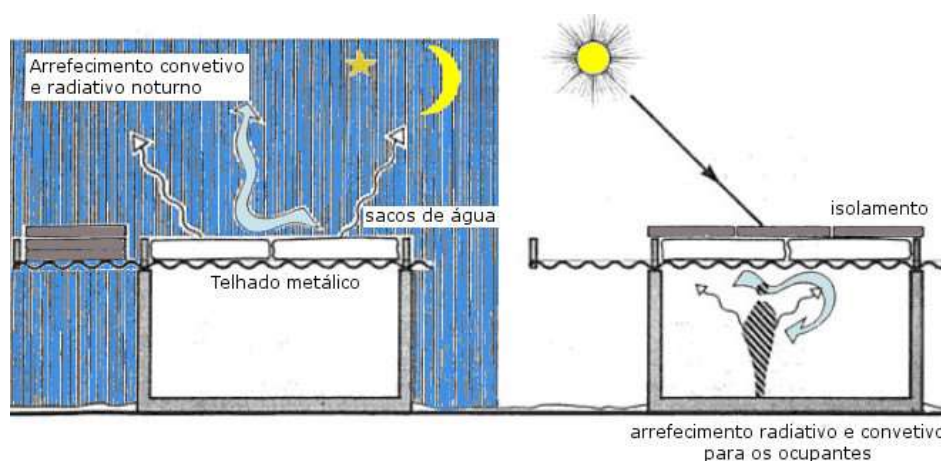


Figura 1.7 – Esquemática de uma das primeiras aplicações da água como armazenador térmico. [1]

Em 1981 a água começou a ser implementada através de um coletor solar térmico plano, acoplado a um reservatório. O coletor é o elemento dissipador, e o reservatório o acumulador térmico, ou elemento de inércia [8]. Durante a noite, o elemento emissor dissipa a energia do acumulador térmico, e ao longo do dia o acumulador absorve a energia em excesso do edifício. No início da década de 90, Erell [9] obteve uma potência de arrefecimento de 81W/m^2 , numa experiência que durou três semanas durante a estação de arrefecimento, o sistema funcionava aproximadamente sete horas por noite.

Outros trabalhos experimentais exploraram as possibilidades de utilização desta tecnologia. Por exemplo, Dobson [10] obteve uma potência de aproximadamente $60,8\text{W/m}^2$ (num clima seco); Ursula Eicker e Antoine Dalibard [11] alcançaram $65,6\text{W/m}^2$ tendo em conta que a temperatura média da água no fim do dia era, em média, de 40°C num clima desértico, ou seja, céu praticamente limpo e temperatura ambiente baixa durante a noite. Estas experiências foram realizadas em painéis solares térmicos alterados, de modo a promoverem mais perdas para o ambiente.

Beck [12] estudou um sistema em que o elemento dissipativo era o próprio fluido de trabalho, tratava-se de um reservatório de água parada aberto para o ambiente. Assim, não existe resistência térmica entre o fluido e o céu e, associado a uma elevada emissividade da água, é promovida a potência de perdas. Obtiveram, no máximo, 120W/m^2 de potência dissipada, em Würzburg. Este sistema não é apenas radiativo, mas também evaporativo [1]. Para além de um reservatório de água parada, pode-se utilizar um sistema em que a água circula sobre uma placa, ou pelo telhado - Figura 1.8.

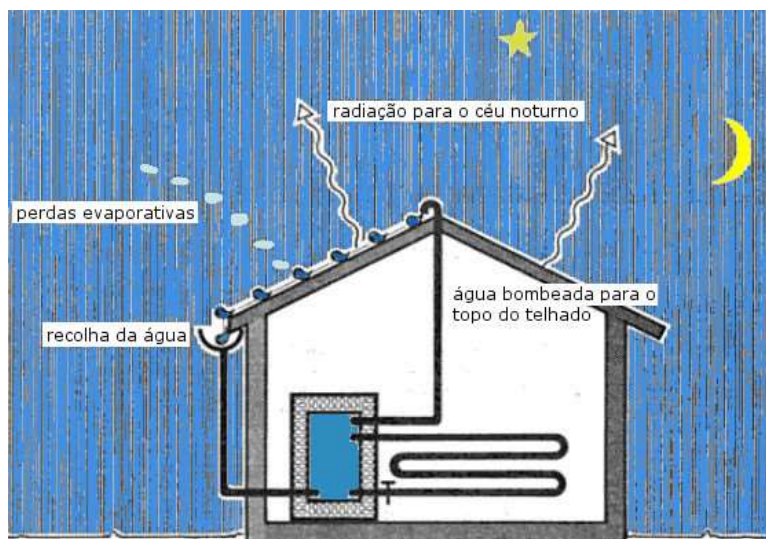


Figura 1.8 – Esquemática do arrefecimento radiativo e evaporativo. [1]

A utilização de um material que maximize o coeficiente de perdas é bastante relevante no entanto, a temperatura do céu exerce bastante influência, assim como o efeito das nuvens [10, 11]. Estes dois parâmetros limitam o potencial de energia dissipada, assim, espera-se que o sistema seja menos eficiente em climas húmidos do que em climas secos.

A aplicação de um sistema de arrefecimento passivo que reduza os consumos de um edifício, pode contribuir para um balanço de consumo energético aproximadamente nulo. Obtendo-se assim um edifício nZEB - a explicação do conceito encontra-se na página 13.

1.2.1. Estudo de sistemas radiativos noturnos

Atualmente estão a desenvolver-se estudos sobre sistemas que funcionam através do conceito de radiação para o céu noturno. Os principais pontos de análise são: (1) os elementos emissores; (2) tipo de armazenamento térmico (água, PCM, entre outros); (3) fluido de trabalho (depende dos pontos anteriores).

O estudo de diferentes componentes como elemento emissor permite alterar a quantidade de calor dissipado. Para além disso, é possível utilizar um sistema que promova outras vantagens como água quente e/ou energia elétrica durante o dia.

Ao utilizar diferentes fluidos/materiais para armazenar a energia de arrefecimento, é possível obter diferentes capacidades de armazenamento para um dado volume, devido ao calor específico. Também, pode ser vantajoso alterar o tipo de armazenamento conforme o arrefecimento que se deseja realizar – por exemplo, para a recirculação de ar pode aplicar-se o PCM.

O fluido de trabalho pode ser ar ou água. Já foi referido que a água é vantajosa, pois tem mais capacidade térmica. O ar adequasse mais a uma utilização imediata e não tanto para armazenamento [1] – (Figura 1.9).



Figura 1.9 – Exemplo de utilização imediata do arrefecimento radiativo utilizando ar. [13]

Elementos emissores

Como elementos emissores podem ser utilizados:

- fluido de trabalho (radiação e evaporação);
- coletor solar térmico;
- coletor solar fotovoltaico térmico;
- chapa acoplada com uma serpentina.

A emissividade de um material varia conforme o comprimento de onda da radiação incidente [14]. Durante a noite o comprimento de onda da radiação do céu insere-se no espectro infravermelho - entre 8 e 13 μm [1, 14, 15]. É nesse comprimento que a emissividade do material utilizado deve ser elevada, de modo a obter a maior dissipação de energia possível.

- **Fluido de trabalho**

Como referido, pode utilizar-se como elemento emissor o próprio fluido de trabalho, água. Trata-se de um processo muito vantajoso pois a água possui emissividade elevada ($\approx 0,97$ [16]) e, não existe resistência térmica associada aos tubos de circulação nem da placa, ocorrendo evaporação, que pode revelar-se uma mais-valia para o arrefecimento. No entanto, existe perda de massa e elevada probabilidade de contaminação através de resíduos [11].

O fluido pode estar parado (reservatório) ou a circular - sobre o telhado, uma chapa de elevada emissividade, ou sobre um coletor solar térmico [17]. Este último permite obter um sistema duplo, aquecimento (durante o dia) e arrefecimento de água (durante a noite).

- **Coletor solar térmico**

Os primeiros estudos realizados, tendo o tema do arrefecimento radiante, utilizaram como elemento emissor coletores solares térmicos vulgares [18], em que a obtenção deste é simples pois encontra-se no mercado. Uma vez que o objetivo dos coletores solares é o aquecimento de água, estes possuem uma proteção de vidro que é transparente para a radiação de comprimento curto, mas opaca para as longas.

A Figura 1.10 representa claramente esse fato, nesta verifica-se que os coletores típicos absorvem radiação de baixo comprimento de onda, refletindo a de alta comprimento, o contrário do desejado para o arrefecimento radiativo noturno. Devido a isto, a utilização de coletores solares para arrefecimento noturno é um meio pouco eficiente [19].

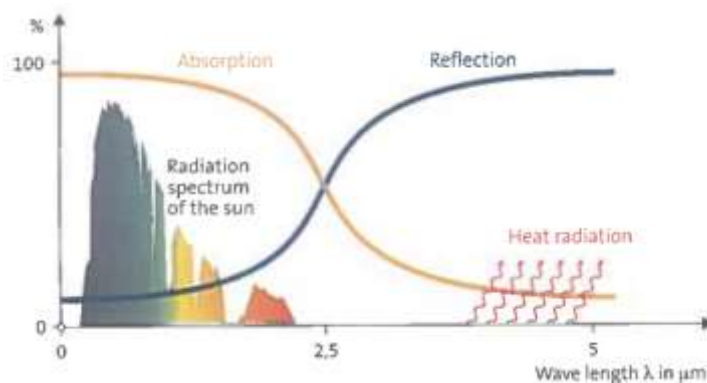


Figura 1.10 – Espectro de absorção/emissividade de um coletor solar térmico. [20]

A eficiência para o arrefecimento aumenta quando a cobertura de vidro é removida, podendo-se optar por pintar o elemento emissor de branco [19], mas se o objetivo de utilização for obtenção de água quente e fria, alternadamente, a eficiência ganha para o arrefecimento tem que compensar a que é perdida na obtenção água quente.

Existem coletores sem cobertura, usualmente utilizados para o aquecimento de piscinas. Estes são de polipropileno, polímero de elevada emissividade para comprimento de onda infravermelho (cerca de 0,95), mas de condutibilidade baixa ($0,25 \text{ W}/(\text{m.K})$) [21]). Existem resultados de experiências realizadas em climas secos, com céu maioritariamente limpo, em que a potência dissipada atinge os $100 \text{ W}/\text{m}^2$ [22].

• **Coletor solar fotovoltaico térmico**

Os coletores fotovoltaicos podem ser utilizados, não apenas para a obtenção de energia elétrica, mas também térmica – fotovoltaicos híbridos/térmicos. Os PV possuem apenas uma cobertura de vidro sobre as células fotovoltaicas para evitar a degradação provocada por fatores atmosféricos. Quando se trata de coletores PVT, estes possuem uma proteção de vidro adicional (com caixa-de-ar não ventilada) para reduzir as perdas, conforme representado na Figura 1.11b.

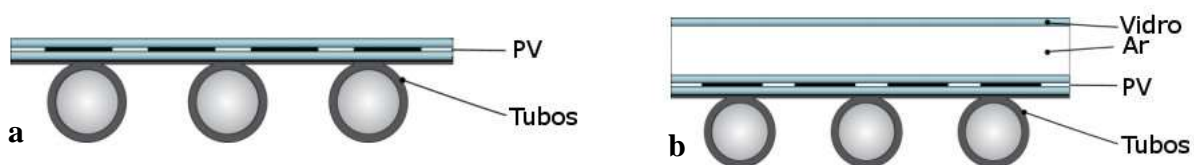


Figura 1.11 – Esquematização de um coletor fotovoltaico térmico sem cobertura de vidro (a) e com cobertura (b). [11]

Note-se que, a utilização de módulos fotovoltaicos como elemento radiativo para o arrefecimento de água é algo pouco abordado pela comunidade científica, havendo poucos estudos publicados neste tema [11]. No entanto, é um elemento comercial e que permite a

obtenção de energia elétrica e térmica, o que supõe uma vantagem face a aplicação de coletores térmicos.

Nesta sequência, o trabalho assume como elemento emissor um coletor fotovoltaico híbrido típico, que contém cobertura protetora das células fotovoltaicas e uma cobertura extra que reduz as perdas de calor (uma desvantagem).

- **Chapa acoplada com serpentina**

Este sistema pode ser simplesmente composto por uma chapa de um dado material e uma serpentina - Figura 1.12.



Figura 1.12 – Esquematização da chapa com a serpentina colada.

Os materiais que podem ser utilizados são diversos, um bom exemplo é o PVF (PolyVinyl-Fluoride) [23]. Este polímero é utilizado como revestimento de módulos fotovoltaicos, funciona como barreira de vapor, para proteger as células do sobreaquecimento e outros componentes sensíveis [24]. Algumas vantagens a enumerar é a sua resistência a radiação UV e a intempere, assim como a sua durabilidade [24].

Para além das propriedades físicas, o que torna este material apropriado para a utilização nestes sistemas é a sua elevada emissividade para comprimentos de onda entre 8 e $13\mu m$ e, elevada refletividade nos outros comprimentos de onda. Permitindo o arrefecimento mais eficiente, e evitando a absorção de calor durante o dia - Figura 1.13.

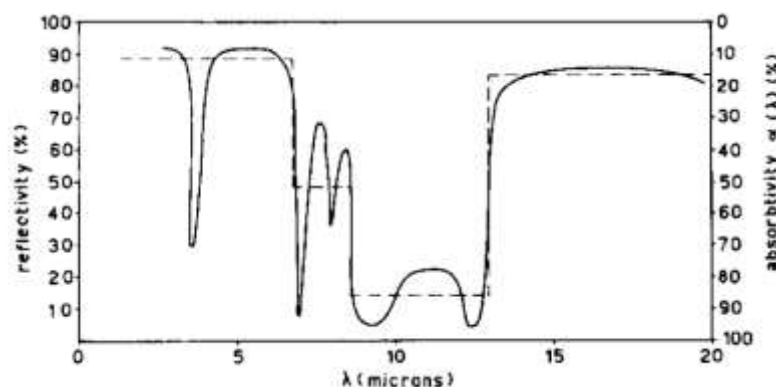


Figura 1.13 – Refletividade e emissividade (absorvidade) do PVF para diferentes comprimentos de onda. [23]

Como se trata de uma tela, necessita de um material que garanta estabilidade, por exemplo o Polietileno, este polímero é bastante transparente para comprimentos de onda entre 8 e $13\mu m$ [23] (Figura 1.14).

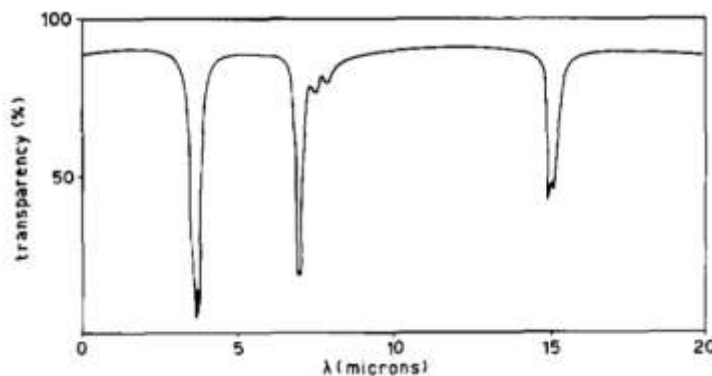


Figura 1.14 – Transparência do polietileno para diferentes comprimentos de onda. [23]

Estes materiais são expostos apenas como sugestões, nenhuma análise referente a estes será realizada. No entanto é considerado como proposta de trabalho futuro para implementação prática e estudo dos resultados.

Meios de armazenamento térmico

O armazenamento térmico pode ser através do próprio fluido de trabalho, ou usando um outro reservatório com o mesmo fluido ou outro fluido/material (PCM [25] - Figura 1.15, pedras [26]).

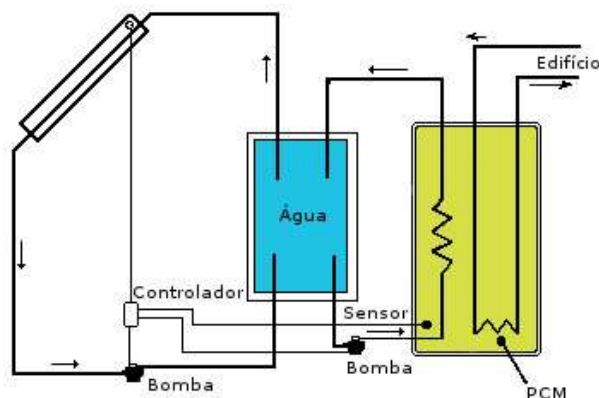


Figura 1.15 – Esquematização do sistema com dois reservatórios. [27]

Um material sugerido é o PCM, este muda de fase a uma dada temperatura, que é escolhida pelo utilizador no ato da aquisição. Pode solidificar aos 20°C e iniciar a sua mudança de solido-liquido aos 22°C. Assim, em contato com o fluido frio fica em estado sólido, mudando de fase quando exposto a temperaturas acima dos 22°C (por exemplo), absorvendo a energia em excesso do fluido agora quente. O fluido de trabalho pode ser água, como esquematizado na figura acima, ou ar que é forçado a circular pelo PCM, em que este pode ter várias formas (microcápsulas, barras, esferas, entre outras).

No sistema que utiliza pedras como elemento de inercia térmica, o fluido de trabalho pode ser o ar. Durante a noite o ar frio passa nas pedras e absorve a energia térmica destas. O ar pode ser arrefecido através de coletores térmicos em que o fluido de trabalho é ar. Durante o dia, o ar quente do edifício circula nas pedras, previamente arrefecidas libertando o calor [26].

Vantagens e desvantagens

Os sistemas de arrefecimento por painel radiativo possuem duas desvantagens de grande peso – o custo e o atravancamento. Para obter uma potência elevada de energia térmica para arrefecimento, é necessária uma área de exposição proporcional. No entanto, na atualidade os edifícios modernos possuem uma área elevada de coletores fotovoltaicos. Se estes forem híbridos, é possível poupar em energia para o arrefecimento [11] e aquecimento (AQS).

Devido às baixas temperaturas que a placa emissora atinge, pode formar-se uma pequena camada de condensação na superfície, e esta acaba por ser uma vantagem e desvantagem. Como a água condensada na parte superior do painel tem uma temperatura mais baixa que o ambiente, esta arrefece a placa diretamente por condução [11]. Segundo Eicker [28] a eficiência do coletor pode aumentar em 3,8 % num ano.

Para além da camada de água, pode-se acumular sujidades, estas reduzem a capacidade de dissipar energia [19], e tornam-se mais difíceis de remover devido ao efeito de condensação referido no parágrafo anterior. Esta acumulação pode afetar a refletividade e a transmissividade entre 0,5 a 1% por dia [19].

1.3.nZEB

nZEB é o conceito de edifício que se espera difundido na Europa durante a próxima década. Este tipo de edifício está dependente de sistemas de conversão energética, que são instalados no próprio edifício ou na periferia. Sendo o objetivo principal reduzir a dependência de energia da rede, e a utilização de fontes fósseis, minorando a poluição.

Antes de mais é necessário entender o conceito envolvido neste termo. O significado mais corrente para nZEB é *net Zero Energy Building*, podendo também significar *nearly (net) Zero Energy Building*, conforme o contexto dado pelo autor [29].

Segundo a REHVA [29], ZEB (*net Zero Energy Building*) é definido como “(...) *um edifício típico que está ligado à rede com elevado desempenho energético. O ZEB balança o consumo de energia primária que utiliza da rede (...) à energia primária que este consegue devolver à rede. Um balanço anual nulo de energia primária leva a uma situação onde uma grande parte da energia convertida no edifício é enviada para a rede. Assim sendo, o ZEB produz energia quando as condições são favoráveis, e utiliza a energia da rede durante o resto do tempo.*” Neste mesmo documento, a REHVA salienta que a diferença principal entre ZEB e nZEB encontra-se no balanço anual de energia primária, em que no nZEB este é aproximadamente zero - Figura 1.16.



Figura 1.16 – Definição esquemática de um nZEB. [29]

Os edifícios ZEB podem estar ligados ou não à rede, pois como a sua utilização de energia iguala a conversão interna, estes não necessitam de energia externa para o seu funcionamento normal [30]. O fato de um ZEB estar ligado à rede permite prescindir de acumuladores de energia, e possibilita a utilização de energia direta da rede quando a conversão das FR não é favorável.

No entanto, os nZEB têm que necessariamente estar ligados à rede, pois o seu conceito é de um consumo aproximadamente nulo, visto que sozinhos não conseguem subsistir a um nível energético (Figura 1.16 e anexos página 75).

Espera-se que no novo regulamento, a classificação energética de nZEB se encontre dentro dos limites do hoje considerado A+. Segundo a IEE [31], em Portugal apenas existem 0,5% de edifícios com a classificação mais elevada. O que indica uma necessidade de atuação nacional de modo a promover sistemas mais eficientes.

Para a definição de nZEB é necessário diferenciar os limites físicos e os de balanço [32] (Figura 1.17), que são definidos como:

- limites físicos: aqueles que delimitam se a energia obtida das fontes renováveis é considerada ‘on-site’;
- limites de balanço: determina qual é a energia utilizada que entra no balanço.

Para o trabalho em causa, a única característica que será analisada do edifício é a sua necessidade de energia primária, efetuando um balanço similar ao da Figura 1.17. Considerasse que o fator de conversão de energia primária é de 2,5, como indicado no documento da REHVA [29].

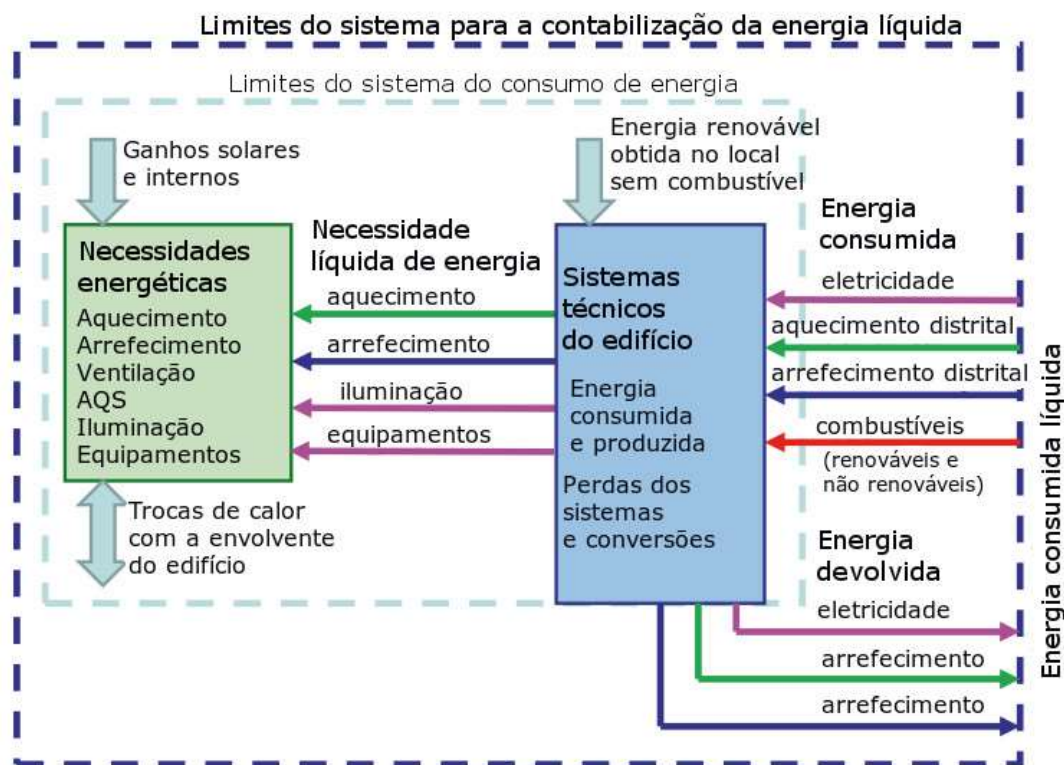


Figura 1.17 – Esquemática dos limites dos nZEB segundo a EPBD. [29]

1.4. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o contributo de uma solução de arrefecimento radiativo em habitações, de modo a minimizar a utilização de uma bomba de calor, e por sua vez, a dependência de energia da rede.

Os pontos a tocar são: (1) energia utilizada pelo sistema convencional de arrefecimento; (2) a energia absorvida do edifício pelo passivo; (3) a potência dissipada pelo sistema para um clima mediterrânico em Portugal; (4) otimização do sistema híbrido (acoplamento do convencional com o passivo); (5) energia elétrica convertida pelos fotovoltaicos; (6) balanço líquido de energia primária.

Para tal é necessário estudar a evolução da potência dissipada pelo sistema radiativo, permitindo observar os pontos fortes e fracos do comportamento deste num ciclo de trabalho anual. Sendo desenvolvido um modelo matemático que representa os fenómenos físicos que ocorrem.

Um outro ponto em análise é a implementação do sistema passivo numa habitação típica portuguesa, tendo em conta o novo RCCTE provisório, verificando assim se é possível atingir o conceito de nZEB (necessidade mínima de energia proveniente de rede elétrica).

1.5. Estrutura

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 explica a motivação do trabalho ao enquadrar a tecnologia em estudo no problema do excesso de utilização energética em Portugal. Complementa a informação com um estado da arte do sistema utilizado, em vista do arrefecimento radiativo noturno.

O Capítulo 2 descreve a modelação matemática do sistema e das propriedades físicas do céu. São também definidas as características e simplificações do sistema. Neste capítulo é explicada a simulação efetuada no TRNSYS, assim como os componentes utilizados.

O Capítulo 3 descreve o edifício em análise, determinando o comportamento térmico e energético deste, assim como as suas necessidades líquidas de energia primária. É também apresentada a solução híbrida para o arrefecimento ambiente, assim como a sua caracterização de funcionamento.

O Capítulo 4 descreve a análise paramétrica realizada, de modo a otimizar as condições de funcionamento do sistema híbrido. São analisados os consumos finais do edifício para o arrefecimento, contabilizando a poupança elétrica devido a implementação do novo sistema.

O Capítulo 5 corresponde ao capítulo final onde são apresentadas as conclusões do trabalho, dificuldades encontradas e sugestões de trabalhos futuros.

Em Anexos encontra-se informação adicional como complemento ao desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 2

Modelação matemática do sistema

- *Descrição do funcionamento do sistema passivo de arrefecimento noturno – página 19 e 20*
- *Modelação matemática do sistema passivo – página 20 até 25*
- *Modelação matemática das propriedades físicas do céu – página 25 e 26*
- *Modelação do sistema passivo no TRNSYS – página 26*

2. Modelação matemática do sistema

A tecnologia em estudo consiste numa bomba de calor apoiada por um sistema passivo de arrefecimento radiante que, através de um dissipador, rejeita calor para uma fonte fria, o céu noturno. Este sistema encontra-se esquematizado na Figura 2.1, onde os principais componentes são assinalados.

A incorporação do sistema passivo reduz os consumos elétricos da bomba de calor, sendo pertinente quantificar esse valor, de modo a verificar se se trata de um sistema vantajoso.

Legenda:

- i. PVT
- ii. Bomba de circulação
- iii. Termoacumulador
- iv. Bomba de calor (sistema auxiliar)

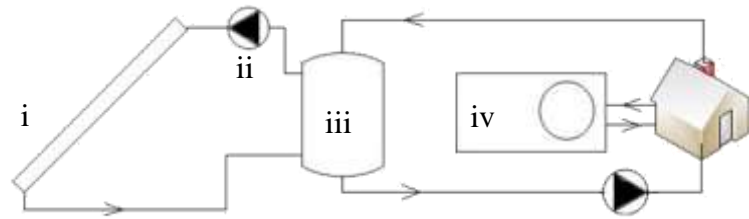


Figura 2.1 – Esquematização do sistema em análise.

Estes sistemas têm uma forte dependência das propriedades do céu. Assim sendo, após a apresentação da modelação numérica, são mencionadas as equações aplicadas que traduzem as propriedades do céu: temperatura, emissividade e nível de nebulosidade.

2.1. Descrição do sistema

Antes de especificar a modelação matemática do sistema procede-se à descrição de certos componentes relevantes. É também especificado o clima envolvente e a origem dos dados climáticos, assim como alguns dos dados de entrada do sistema.

2.1.1. PVT

- O coletor tem uma cobertura de vidro com caixa-de-ar não ventilada, solução construtiva mais frequente no mercado;
- Estão orientados a sul, para maximizar a energia elétrica convertida durante o dia;
- As propriedades físicas correspondentes ao elemento fotovoltaico encontram-se em anexo, e correspondem a um painel PV comercial - **Características do painel fotovoltaico**, página 78;
- Restantes propriedades encontram-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Condições de análise do PVT.

Emissividade do vidro	0,85
Número de coberturas de vidro	1

2.1.2. Reservatório

- O tanque tem 5 níveis de estratificação – todos com a mesma altura;
- A Tabela 2.2 contém os dados mais relevantes do reservatório;
- O fluido de trabalho é água, preferencialmente glicolada (base química de propileno).

Tabela 2.2 – Condições de análise do reservatório.

Coeficiente de perda	0,83	$W/m^2 \cdot K$
Níveis de estratificação	5	-

2.1.3. Dados climáticos

Optou-se por utilizar os dados climáticos da Meteonorm, uma empresa com mais de 25 anos de experiência na área da meteorologia e de programas de cálculos solares para diversos locais mundiais [33]. A empresa garante que estes dados são determinados com modelos sofisticados de interpolação, que permite obter os dados em diversos pontos geográficos.

A simulação tem como localização Faro (Algarve – Portugal), onde o clima é mediterrânico, temperado e com pouca ocorrência de chuva [34]. Sendo classificado pelo regulamento [35] como zona I1 e V2 sul. A localização geográfica é definida como: latitude $37,1^\circ N$ e altitude $8,1^\circ W$, e tem altitude referente ao nível do mar de 8 m [36].

2.2. Modelação do sistema

2.2.1. PV-térmico

A modelação matemática do coletor é complexa, pois as perdas dependem do vento, das temperaturas (fluido, placa, ambiente e céu) e da geometria. A Figura 2.2 representa um esquema dos fenómenos de transferência de calor que ocorrem neste elemento.

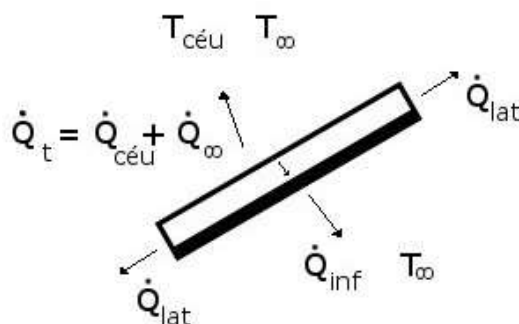


Figura 2.2 – Representação esquemática da transferência de calor no PVT.

A temperatura do vidro depende do ambiente (T_{∞}) e do céu, havendo trocas convectivas e radiativas. Estas incluem, respetivamente, o efeito do vento com a temperatura ambiente e a temperatura do céu. Entre o vidro e a placa fotovoltaica existe uma caixa-de-ar não ventilada, que induz trocas de calor entre estes através da convecção natural. Entre as células fotovoltaicas e a parte posterior do coletor apenas ocorre condução de calor, havendo perda para o ambiente.

As perdas de calor pelo topo do coletor (\dot{Q}_t) são usualmente aproximados pela *nova equação de Klein* [37], que pode ser simplificada - *equação de Klein simplificada* [38]. Esta última será adaptada ao modelo em estudo - anexo **Equações de Klein**, página 76 - pois implica menos esforço computacional e o erro é baixo [38].

Apesar das perdas pelo topo do coletor corresponderem à maior percentagem de perdas [38], é também necessário contabilizar as laterais e da superfície inferior do coletor. Estas são determinadas através das relações (2.1) e (2.2), respetivamente [37], e tomam valores constantes ao longo do tempo.

$$U_{inf} = \frac{\lambda_{iso;pvt}}{e_{iso;pvt}} \quad (2.1)$$

$$U_{lat} = \frac{(U \cdot A)_{lat}}{A_{pvt}} \quad (2.2)$$

Como estas perdas são consideravelmente inferiores às perdas do topo, o cálculo destes fatores não influencia de forma relevante a análise [37], assim sendo, a soma destes será considerada $1,2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, tomando como exemplo o trabalho apresentado pelos autores Hanane Dagdougui *et al* [39]. Esta consideração deve-se, em parte, à falta de informação de certos pormenores construtivos dos coletores.

Finalmente, o calor total dissipado é obtido pela relação (2.3) [14, 37], onde $T_{p;m}$ e T_∞ representam a temperatura média da placa e a temperatura ambiente, respetivamente, e A_{pvt} a área útil de emissão do coletor.

$$\dot{Q}_{pvt} = (U_t + U_{inf} + U_{lat}) \cdot (T_{p;m} - T_\infty) \cdot A_{pvt} \quad (2.3)$$

Como se verifica, na equação anterior as perdas contabilizadas desconsideram o efeito do céu. Sendo a temperatura deste inferior à ambiente, as perdas calculadas quando se assume este efeito são mais elevadas. Alguns autores estimam que a diferença entre a temperatura do céu e ambiente ronda os 5°C , em climas quentes e húmidos, e pode atingir os 30°C no inverno, para um clima seco [37].

Deste modo torna-se necessário corrigir o coeficiente de perdas pelo topo - U_t , para contabilizar o efeito da temperatura do céu. Assim, procede-se à desagregação na equação (2.3) da componente afetada pelo céu - equação (2.4).

$$\dot{Q}_{pvt} = [(U_{inf} + U_{lat} + U_{t;conv}) \cdot (T_{p;m} - T_\infty) + U_{t;k;pvt} \cdot (T_{p;m} - T_\infty)] \cdot A_{pvt} \quad (2.4)$$

Para tal, é necessário analisar mais profundamente a equação de Klein e dividi-la entre as componentes: convectiva (2.5) e radiativa (2.6).

$$U_{t;conv} = \left[\frac{N_v}{\frac{C_k}{T_{p;m}} \cdot \left(\frac{T_{p;m} - T_\infty}{N_v + F_k} \right)^{0,33}} + \frac{1}{U_w} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

$$U_{t;k;pvt} = \frac{\sigma \cdot (T_{p;m} + T_\infty) \cdot (T_{p;m}^2 + T_\infty^2)}{(\varepsilon_p + 0,05 \cdot N_v \cdot (1 - \varepsilon_p))^{-1} + (2 \cdot N_v + F_k - 1) \cdot \varepsilon_v^{-1} - N_v} \quad (2.6)$$

A componente radiativa é a única que necessita de ser corrigida, pois as perdas convectivas são apenas para o ambiente. Assim, o ajuste é introduzido através de uma emissividade equivalente (2.7):

$$\varepsilon_{eq} = \left[\left(\varepsilon_p + 0,05 \cdot N_v \cdot (1 - \varepsilon_p) \right)^{-1} + (2 \cdot N_v + F_k - 1) \cdot \varepsilon_v^{-1} - N_v \right]^{-1} \quad (2.7)$$

Por fim, o coeficiente de transferência de calor radiativo pode ser traduzido na equação (2.8), onde é contabilizado o efeito da temperatura do céu:

$$U_{t;pvt} = \varepsilon_{eq} \cdot \sigma \cdot (T_{p;m} + T_{céu}) \cdot (T_{p;m}^2 + T_{céu}^2) \quad (2.8)$$

Desta forma o calor total dissipado pelo coletor pode ser traduzido pela equação (2.9):

$$\dot{Q}_{pvt} = \left[(U_{inf} + U_{lat} + U_{t;conv}) \cdot (T_{p;m} - T_{\infty}) + U_{t;pvt} \cdot (T_{p;m} - T_{céu}) \right] \cdot A_{pvt} \quad (2.9)$$

Para obter o coeficiente de convecção é necessário conhecer o coeficiente de perdas devido ao efeito do vento (U_w). Duffie e Beckman [37] propõem duas hipóteses, equação (2.10) e (2.11), no entanto a última não é recomendada para coletores com comprimentos diferentes de 0,5m. Assim sendo, para o modelo será aplicada a relação (2.10).

$$U_w = 5,7 + 3,8 \cdot V_w \quad (2.10)$$

$$U_w = 2,8 + 3,0 \cdot V_w \quad (2.11)$$

A temperatura média da placa durante o dia é sempre superior à temperatura ambiente [13] e durante a noite ocorre o inverso (devido à elevada emissividade da placa). Esta temperatura é estimada pela relação (2.12), em que é necessário conhecer a geometria do coletor para o cálculo do fator de remoção de calor (F_R). Este último é estimado através da formulação exposta em anexo, página 76.

$$T_{p;m} = T_{f;i} + \frac{\dot{Q}_{pvt} \cdot (1 - F_R)}{A_{pvt} \cdot F_R \cdot U_{tot}} \quad (2.12)$$

2.2.2. Reservatório

O reservatório utilizado no modelo trata-se de um termoacumulador de duas entradas e duas saídas, com estratificação. A água sai pela parte superior do tanque para o coletor e, entra pela parte inferior (o contrário do que acontece quando se trata de aquecimento de água). A estratificação é modelada através de uma análise nodal ao longo do reservatório, conforme representado na Figura 2.3 e Figura 2.4.

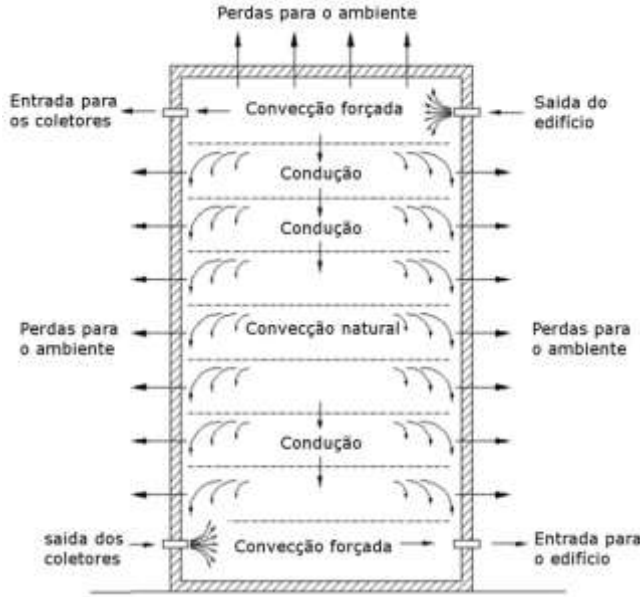


Figura 2.3 – Distribuição nodal do reservatório. [40]

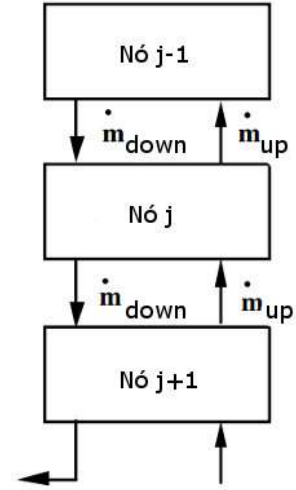


Figura 2.4 – Esquematisação do fluxo mássico entre os nós. [41]

Para a modelação do reservatório é utilizado o método implícito bidimensional [42], procedendo-se assim à análise de um nó fictício, o nó j da Figura 2.4, obtendo-se a Figura 2.5. Nesta estão representados todos os fluxos energéticos existentes no sistema [42, 43]. No balanço considera-se que a condutividade térmica do fluido é constante (ao longo do tempo e do eixo), assim como o tipo e espessura do isolamento do reservatório.

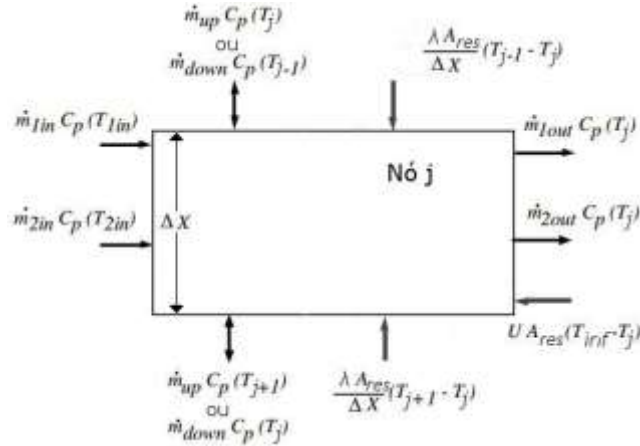


Figura 2.5 – Balanço energético do reservatório. [41]

A equação (2.13) traduz a análise matemática de um nó central, onde é contabilizada a transferência de massa de um fluxo vertical, devido à entrada e saída de massa pelas extremidades ($\dot{m}_{up/down}$).

$$\begin{aligned} \dot{m}_j \cdot C_p \frac{dT_j}{dt} = & \frac{\lambda \cdot A_{res;j}}{\Delta X} \cdot (T_{j+1} + T_{j-1} - 2 \cdot T_j) + U_{res} \cdot A_{res;j} \cdot (T_{\infty} - T_j) + \\ & + \dot{m}_{down} \cdot C_p \cdot (T_{j-1} - T_j) + \dot{m}_{up} \cdot C_p \cdot (T_{j+1} - T_j) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Nos extremos existe movimento de massa consequente do fluxo de água de entrada e saída do reservatório, havendo apenas um fluxo na vertical (*up* ou *down*) - equação (2.14). Ao analisar o nó da parte superior do tanque há que contabilizar a área referente ao topo nas perdas convectivas para o exterior.

$$\begin{aligned} \dot{m}_j \cdot Cp \frac{dT_j}{dt} = & \frac{\lambda \cdot A_{res;j}}{\Delta X} \cdot (T_{j\pm 1} + T_j) + U_{res} \cdot A_{res;j} \cdot (T_\infty - T_j) + \\ & + \dot{m}_{down/up} \cdot Cp \cdot (T_{j\pm 1} - T_j) + Cp \cdot (\dot{m}_{1/2;in} \cdot T_{1/2;in} - \dot{m}_{1/2;out} \cdot T_j) \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.2.3. Bomba

A bomba é o elemento responsável pela circulação do fluido desde o coletor até o reservatório, e deste para o sistema de climatização do edifício. A primeira entra em funcionamento depois do por do Sol, ou seja, quando o sensor não deteta radiação solar. E a segunda, quando a temperatura do edifício atinge o limite máximo estabelecido.

A modelação matemática deste componente é simples, sendo analisados apenas três pontos: (1) potência da bomba; (2) caudal; (3) temperatura de saída da água.

A variação do caudal (2.15) e da potência (2.16) dependem do funcionamento das bombas, tomando apenas dois valores, o valor máximo quando está em funcionamento ($\gamma = 1$) ou zero quando não funciona ($\gamma = 0$). O valor de γ é imposto pelo controlador, que está ligado a um sistema que verifica a radiação solar, e um outro que lê a temperatura no interior do edifício.

$$\dot{m}_f = \gamma \cdot \dot{m}_{100\%} \quad (2.15)$$

$$P_b = \gamma \cdot P_{100\%} \quad (2.16)$$

No que trata a temperatura de saída do fluido na bomba, esta por vezes é considerada igual à de entrada, no entanto não é o que acontece na realidade. A bomba ao funcionar está a dissipar energia em forma de calor, que é absorvida pelo fluido. Deste modo, a temperatura do fluido aumenta conforme a potência da bomba (2.17):

$$T_{out;b} = T_{in;b} + \frac{P_b \cdot (1 - \eta_b)}{\dot{m}_f \cdot Cp} \quad (2.17)$$

No entanto este efeito é quase irrelevante e é constante - Tabela 2.3. Nessa mesma tabela encontram-se outras propriedades relevantes das bombas escolhidas. Estas foram escolhidas segundo os caudais convencionalmente utilizados em coletores solares térmicos [20].

Tabela 2.3 – Propriedades da bomba utilizada. [44]

	PVT - Tanque	Tanque - Edifício
Caudal máximo [kg/h]	2400	3180
Caudal efetivo [kg/h]	2400	3000
Potência [W]	93	93
η_b	95 %	
ΔT	0,0353	0,0283

2.2.4. Simplificações

Como qualquer modelo que tenta estimar o comportamento real de um dado sistema, é necessário recorrer a certas simplificações, estando enumeradas de seguida:

- Para o vidro do coletor fotovoltaico, que origina a caixa-de-ar, assume-se a mesma temperatura dos dois lados;
- Não se consideram as dimensões da caixa-de-ar;
- Não se considera a condensação nem sujidades sobre a superfície do elemento emissor;
- A inclinação do coletor é considerada apenas na convecção natural do interior da caixa-de-ar;
- Considera-se a temperatura do vidro e da placa uniforme;
- Não são contabilizadas as perdas de carga imposta pelos equipamentos.

2.3. Temperatura e nebulosidade do céu noturno

Para completar o modelo é necessário estimar a temperatura fictícia do céu. Esta não se trata de uma propriedade independente, pois está diretamente relacionada com a nebulosidade e a emissividade, que por sua vez depende das propriedades psicométricas do céu e da localização.

2.3.1. Nebulosidade

Quando o céu se encontra sem nuvens obtém-se a dissipação máxima de potência possível, o que torna a contabilização da nebulosidade bastante relevante para a determinação da energia dissipada. A relação (2.18) representa a correlação utilizada para a contabilização do fator de nebulosidade do céu durante o dia [45]:

$$F_{cover} = \left(1,4286 \cdot \frac{Rad_{Dif,H}}{Rad_{Glob,H}} - 0,3 \right)^{0,5} \quad (2.18)$$

Este fator depende da relação entre a radiação difusa e global horizontal emitida pelo Sol, no entanto, durante a noite estes valores são nulos. Assim, o fator de nebulosidade noturno é aproximado através da média dos valores obtidos durante a tarde (entre as 14 e as 16 horas – período do dia em que existe radiação solar durante o ano todo).

2.3.2. Emissividade

Para determinar a temperatura do céu é necessário considerar a emissividade do céu limpo (sem nuvens). Esta pode ser aproximada por uma equação linear (2.19) [46] ou quadrática (2.20) [13], que dependem apenas da temperatura ambiente. No entanto, esta característica do céu está relacionada também com as propriedades do ar e com a hora do dia (2.21) [47].²

$$\varepsilon_{cl} = 0,741 + 0,0062 \cdot T_{\infty} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{cl} = 0,711 + 56 \times 10^{-4} \cdot T_{\infty} + 73 \times 10^{-6} \cdot T_{\infty}^2 \quad (2.20)$$

² Para a determinação da emissividade utiliza-se as temperaturas em graus Kelvin.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cl} = & 0,711 + 0,005 \cdot T_{\infty} + 73 \times 10^{-6} \cdot T_{\infty}^2 + \\ & + 0,013 \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{H}{24} \right] + 12 \times 10^{-5} \cdot (p_{\infty} - p_{ho})\end{aligned}\quad (2.21)$$

Das relações apresentadas a (2.21) considera mais pormenorizadamente as propriedades ambiente, assim será esta a utilizada para a determinação da temperatura do céu. Para o cálculo da pressão atmosférica recorre-se à equação dos gases perfeitos e à variação de pressão em relação à pressão de referência, nível do mar. A equação utilizada e a sua dedução encontram-se em anexo - **Pressão atmosférica** página 77.

Visto que o céu limpo é uma premissa improvável, é necessário determinar a emissividade do céu considerando o fator da nebulosidade previamente estimado (F_{cover}) – relação (2.22) [11].

$$\varepsilon_{céu} = \varepsilon_{cl} + 0,8 \cdot F_{cover} \cdot (1 - \varepsilon_{cl}) \quad (2.22)$$

2.3.3. Temperatura

A temperatura do céu pode considerar o céu limpo ou nublado [11, 47], sendo mais importante, neste caso, considerar a nebulosidade. A equação (2.23)³ é válida para determinar a temperatura em ambas as situações, utilizando a emissividade correspondente.

$$T_{céu} = T_{\infty} \cdot \varepsilon^{0,25} \quad (2.23)$$

2.4. Modelação no TRNSYS

O *software* utilizado, TRNSYS, é um programa de simulação detalhada que está indicado para aplicação no campo da engenharia, associado a energia proveniente de fontes renováveis. Este permite a construção do sistema através de módulos, havendo a possibilidade de aumentar ou diminuir o número de componentes.

Neste capítulo foram apresentadas as correlações propostas e as suas respetivas deduções, no entanto este *software* já contém módulos (*types*) que utilizam correlações pré-definidas. A possibilidade de acrescentar e reduzir a quantidade de módulos no modelo computacional facilita o desenvolvimento do projeto, pois permite que seja simples a alteração do sistema, como se fosse físico.

Nem todos os módulos do TRNSYS estão programados com as relações apresentadas, assim sendo, é necessário adaptá-los de modo a coincidirem com o sistema modelado. Para tal é utilizado um componente denominado por “*Equations*” que permite inserir manualmente a equação pretendida, ou complementar/corrigir outros componentes.

Os componentes principais modelados no TRNSYS, representados na Figura 2.1 (página 19), são apresentados de seguida:

- **PV-térmico - Type 50b:** Este componente utiliza a *equação de Klein* simplificada para estimar o coeficiente de perdas pelo topo. Como explicado,

³ Temperaturas obtidas em graus Kelvin.

essa equação não é totalmente válida à noite, então é necessário adicionar o componente ‘*Equations*’ com as correções expostas anteriormente.

- **Edifício:** Para a especificação das características do edifício, da envolvente e dos diversos perfis de utilização, recorre-se ao *software* de apoio TRNBuild. Este gera um ficheiro que é lido diretamente no TRNSYS.

Os restantes equipamentos representados na figura não são mencionados pois os componentes do TRNSYS coincidem com o modelado matematicamente. Os restantes módulos estão apresentados em anexos, assim como o esquema das ligações do TRNSYS - **Modelação no TRNSYS** página 80.

Capítulo 3

Caraterização do caso de estudo

- *Caracterização do edifício:*
 - *Perfis de utilização – página 31*
 - *Envolvente - página 32*
 - *Comportamento térmico da envolvente - página 32*
 - *Comportamento energético do edifício - página 34*
- *Caracterização do funcionamento do sistema híbrido (acoplamento do sistema de arrefecimento convencional com o apoio do sistema passivo) - página 35*

3. Caraterização do caso de estudo

Neste capítulo é apresentado um edifício modelo que é analisado a nível térmico para se compreender a evolução da sua temperatura interior sem sistema de climatização – *free-floating*. Posteriormente, a análise é estendida à componente energética para explicitar as necessidades energéticas de climatização.

Como referido, o sistema de climatização principal é uma bomba de calor, com COP 3 e 4, para arrefecimento e aquecimento, respetivamente - segundo a norma portuguesa [35]. Assume-se que esta trabalha com potência ilimitada, de modo a garantir que a temperatura do edifício é sempre inferior ao limite imposto. Esta entra em funcionamento quando a temperatura do edifício atinge um dado limite, desde que haja ocupação.

Para uma facilidade de leitura dos dados, o valor da fatura anual de eletricidade é convertida em valor moeda, para tal considera-se que o custo da energia elétrica da rede é de 0,1405 €/kWh – tarifa simples EDP [4].

3.1. Características do edifício

Os estudos em causa são realizados num edifício residencial modelo, em conformidade com o novo regulamento (RCCTE), nomeadamente no que diz respeito às características construtivas. Segundo o “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico” de 2010 [3], em Portugal, uma habitação tem em média 107 m² de área útil, onde vivem 3 pessoas. Assim, optou-se por definir uma área de 100 m², e 3 m de pé direito, para uma ocupação de três pessoas. Trata-se de um edifício térreo, quadrangular, composto apenas por espaços úteis.

Considera-se que cada pessoa consome 36 l/dia de água quente, a uma temperatura média de 60°C. O sistema principal para o aquecimento de água sanitária é uma resistência elétrica, sendo o armazenamento um termoacumulador de 300 l (0,3 m³), estratificado. O consumo de eletricidade anual é de 2067 kWh (valor estatístico [3], mais pormenores em anexo página 82 - **Consumos elétricos médios**).

Não é considerada regulação de humidade no edifício, nem é acrescentada ventilação forçada. Há apenas infiltrações com o valor mínimo regulamentar, de 0,6 rph [35]. Relativamente às temperaturas limites, assume-se 21°C durante o período de aquecimento, como estipulado na regulamentação europeia, DIN EN 15251 [48], para um edifício na Categoria I com sistema convencional forçado (segundo o PPD desejado - < 6%). O limite no período de arrefecimento é explicado posteriormente na página 34, **Comportamento energético**.

3.2. Perfis de utilização

- Cada elemento da família dissipa 1,2 Met nas atividades em casa (120 W);
- A família partilha o mesmo horário:
 - De segunda a sexta-feira a casa está vazia das 8h até as 19h;
 - Sábado e domingo a casa está vazia das 14h até as 20h.
- A iluminação dissipa de 5 W/m² (segundo a agenda em anexo), considerando-se 8 lâmpadas, em que 60% da energia térmica é transmitida por convecção, a restante por radiação.

Os perfis de utilização de equipamentos, iluminação e ocupação encontram-se em anexo, página 80.

3.3. Envolvente exterior

A envolvente exterior encontra-se detalhada em anexo na página 83 (**Envolvente exterior**), contendo na Tabela 3.1 o resumo com os respetivos coeficientes de transmissão térmica:

Tabela 3.1 – Resumo dos coeficientes de transmissão térmica da envolvente do edifício e os respetivos limites. [35]

Envolvente	Valor de referência	Valor utilizado	Unidades
Vertical opaca	0,70	0,54	W/m ² °C
Horizontal opaca	0,50	0,50	
Envidraçados	4,30	2,80	
Fator solar	0,50	Entre 0,32 e 0,25 ⁴	

As pontes térmicas lineares consideradas no edifício, incluindo a envolvente em contato com o solo, contabilizam 168 W/°C (**Pontes térmicas lineares** página 86). Relativamente à cor da envolvente, esta é clara, de modo que o coeficiente de absorção de radiação solar toma o valor de 0,4 [35].

A envolvente envidraçada consiste em vidro duplo incolor (4 a 8 mm + 5 mm com $g_{\perp;env} = 0,75$), sem corte térmico e caixilharia metálica. A proteção exterior é uma persiana metálica clara ($g_{\perp;ps} = 0,04$) e, tem no interior, uma cortina opaca clara ($g_{\perp;ps} = 0,37$) [35]. As restantes informações encontram-se em anexo - **Envidraçados** página 86.

Note-se que a inércia do edifício é forte. ⁵

3.4. Simplificações

Foram realizadas as seguintes simplificações de modo a otimizar o tempo de simulação:

- Cada fachada tem duas janelas, 6 m² cada;
- Não é considerado qualquer tipo de sombreamento;
- A orientação das fachadas é coincidente com os pontos cardeais principais ⁶;
- Toda a envolvente é contínuas e homogénea;
- A distribuição da temperatura no espaço é uniforme;
- No AQS a temperatura da água da rede é considerada constante ao longo do ano, 15°C;
- O consumo das bombas de circulação de AQS não é contabilizado.

3.5. Comportamento térmico

A simulação em *free-floating* permite avaliar o desempenho térmico da solução construtiva, de modo a determinar o comportamento do edifício quando ausente de qualquer sistema para regulação da temperatura.

⁴ Depende da orientação [35] "RCCTE - Versão provisória," ed, (talvez) 2014.

⁵ Detalhes do cálculo da inércia em anexo página 101.

⁶ Norte, Sul, Este e Oeste

Através da simulação do edifício, exposto ao clima de Faro durante um ano, é possível realizar uma pré-análise do comportamento térmico deste. Tendo como objetivo determinar os picos de temperaturas mais elevados.

Como limite de temperatura no período de aquecimento é utilizada a equação (3.1), visto que o objetivo é climatizar uma habitação na qual se espera adaptabilidade por parte dos ocupantes. Este é o limite imposto num edifício climatizado por sistemas passivos, segundo o regulamento [48].

$$T_{int;ed}^{máx} = 0,33 \cdot T_{\infty} + 20,80 \quad (3.1)$$

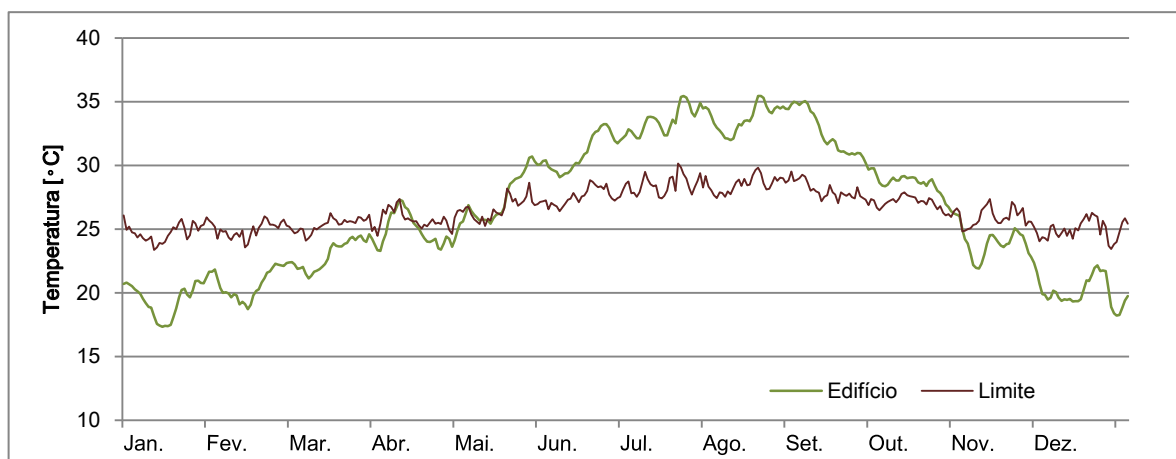


Figura 3.1 – Variação da temperatura média diária no interior do edifício ao longo do ano e respetivo limite máximo regulamentar.

Recorrendo à Figura 3.1 verifica-se que de junho a outubro a temperatura média diária do edifício excede o limite. Complementado com a Figura 3.2, nota-se que de junho até setembro, durante cerca de 60% do período de ocupação, a temperatura no interior é superior ao limite estabelecido, havendo um elevado sobreaquecimento.

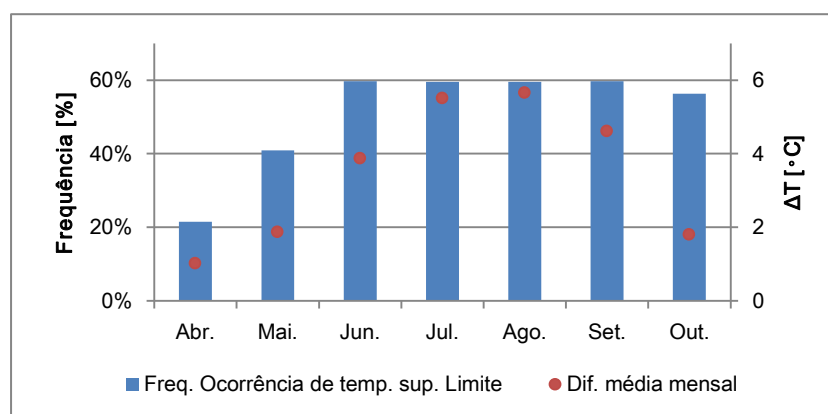


Figura 3.2 – Representação gráfica da frequência de ocorrência de temperaturas superiores ao limite e quantificação da diferença média mensal no período em que o edifício se encontra ocupado.

Desta análise conclui-se que este edifício possui uma tendência para o sobreaquecimento, principalmente, devido à baixa otimização da envolvente, como a inexistência de sombreamentos. No entanto, para a análise proposta este edifício permite avaliar os resultados numa situação extrema.

3.6. Comportamento energético

O sistema convencional, sustentado por energia puramente elétrica, garante que a temperatura no interior do edifício seja sempre inferior ao limite imposto (equação (3.1)) durante o período de ocupação, pois é permitido que este funcione a uma potência ilimitada. São também determinadas as necessidades de aquecimento.

Após a simulação conclui-se que as necessidades energéticas de arrefecimento são 3527 kWh/ano, e as de aquecimento 676 kWh/ano. Verificou-se ainda, que o pico para o arrefecimento ocorre no mês de julho, atingindo os 4193W, e o de aquecimento é de 2586W, em dezembro. Relativamente ao AQS existe uma necessidade de 1912 kWh/ano.

Na Figura 3.3 encontra-se a representação gráfica de três temperaturas: média diária no interior do edifício em (1) *free-floating* e (2) equipado com BC e (3) o limite regulamentar. Devido à utilização limitada da bomba de calor para os períodos de ocupação, o edifício atinge temperaturas acima do limite quando está desocupado.

Como complemento, em anexo (**Comportamento energético** – página 88) encontram-se gráficos que demonstram a evolução da temperatura exterior e interior média diária, assim como a energia média diária absorvida ao longo do período de arrefecimento.

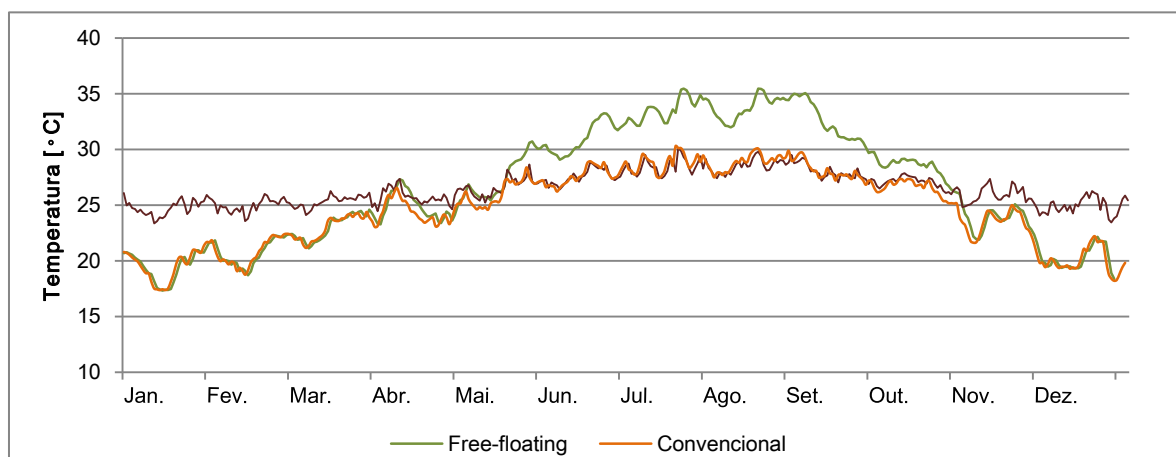


Figura 3.3 – Variação da temperatura média diária no interior do edifício ao longo do ano e respetivo limite regulamentar (sem contabilizar o efeito do aquecimento ambiente).

As necessidades energéticas do edifício encontram-se na Tabela 3.2, o que perfaz uma fatura de eletricidade de 5324 kWh/ano, 748 €/ano.

Tabela 3.2 – Necessidades energéticas e elétricas do edifício [kWh/ano].

Necessidades:	Energéticas	Elétricas
Aquecimento ambiente ⁷	676	169
Arrefecimento ambiente ⁷	3527	1176
AQS	1912	1912
Outros	2067	2067

⁷ Necessidades elétricas determinadas conforme o COP (3 de arrefecimento e 4 para aquecimento).

Seguindo a metodologia proposta pela REHVA para a determinação do balanço líquido de energia, a necessidade de energia primária totaliza os 133,10 kWh/(m².ano). Para reduzir este valor é incorporado um sistema de apoio passivo, formando um sistema híbrido. Este acoplamento introduz outros benefícios, como apoio no AQS e obtenção de energia elétrica.

3.7. Caracterização de funcionamento do sistema híbrido

O sistema híbrido resulta da introdução do sistema passivo no edifício como apoio para a bomba de calor. A análise do novo sistema tem como objetivo estudar a influência deste no consumo elétrico do convencional, o que se reflete na necessidade de estimar a energia que pode ser absorvida do edifício por parte do banco de gelo – termoacumulador do sistema passivo. Assim, optou-se por uma solução simplificada do sistema de climatização de apoio.

Assume-se que o arrefecimento é realizado através de um teto radiante que possui uma área elevada. Esta condição proporciona que temperatura de saída do fluido seja igual à temperatura média da sala - equivale a um permutador com 100% de eficiência. O caudal é constante e toma o valor de 4 kg/min, pois encontra-se dentro do limite usualmente aplicado em tetos radiantes [49]. Este sistema de arrefecimento troca calor através de radiação e convecção, sendo considerado que 70% da troca é realizada por radiação e o restante por convecção [50].

Visto que o passivo é utilizado para amortecer o trabalho realizado pela BC, o arrefecimento por teto radiante deverá garantir um período de funcionamento favorável. Este trata-se de um parâmetro que é foco de estudo no próximo capítulo (**Período de funcionamento** página 39). Quando a temperatura do fluido de arrefecimento é inferior à temperatura de orvalho ($T_{wb}+2^{\circ}\text{C}$) do edifício, este sistema não funciona, prevenindo a condensação.

Algumas outras especificações, relativamente ao acréscimo deste novo sistema na habitação, encontram-se enumeradas de seguida:

- O sistema radiativo apenas funciona após o pôr-do-sol e na estação de aquecimento – abril a outubro [36];
- O sistema para a obtenção de energia elétrica é composto por um inversor DC/AC com rendimento de 80 % [51].

Para obter o melhor resultado é necessário proceder à otimização da instalação, sendo para tal realizada uma análise paramétrica dos diferentes valores de entrada. Alguns dos parâmetros iniciais já foram definidos anteriormente (**Descrição do sistema** página 19), os restantes encontram-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros para o início da otimização do sistema.

Caudal	60	kg/h.m ²
Glicol⁸	25	%
Envolvente do reservatório	Exterior	-
Tipo de ligação	Paralelo	-
Inclinação do PVT	37,1	°
Volume	5	m ³
Emissividade	0,85	-
Proteção de vidro?	Sim	-

A escolha destes parâmetros resultou de alguma pesquisa bibliográfica sobre valores utilizados comumente, os outros são arbitrados tendo em conta o propósito de utilização:

- Caudal – valor utilizado usualmente para AQS [20];
- Glicol – valor mínimo recomendável para coletores [52];
- Volume – valor arbitrado;
- Envolvente exterior – para ajudar a dissipação noturna por convecção diretamente no termoacumulador;
- Inclinação – para maximizar os ganhos térmicos na obtenção de eletricidade [53];
- Emissividade e existência de cobertura de vidro – propriedades do coletor.

É a partir destes valores que se inicia o processo de otimização.

⁸ As propriedades da água com 25% de glicol encontram-se em anexo – página 116

Capítulo 4

Análise de resultados

- *Determinação do funcionamento do sistema passivo*
 - *Set-point – página 39 até 41*
 - *Período de funcionamento- página 41 e 42*
- *Determinação da área ótima – página 42 e 44*
- *Otimização dos parâmetros do sistema radiativo – página 44 até 55*
- *Resultados otimizados – página 55 até 59*

4. Estudo paramétrico

O objetivo neste capítulo é otimizar o sistema auxiliar de modo a reduzir as necessidades de energia primária, determinando assim os valores ideais para:

- Caudal de fluido;
- Percentagem de glicol na água;
- Volume do reservatório;
- Meio envolvente do reservatório;
- Tipo de ligação: paralelo – série;
- Inclinação do painel PVT.

Existe uma limitação que prejudica a dissipação de energia: a cobertura de vidro e a caixa-de-ar de proteção do coletor. De modo a contabilizar o potencial perdido será realizada uma pequena análise no fim do capítulo.

Antes de aprofundar a análise é determinado o período de funcionamento e a área ideal que minimiza a utilização da bomba de calor. Ao longo do capítulo os valores obtidos serão utilizados na otimização do próximo parâmetro, visto que estão todos interligados.

Nota: todos os valores médios referem-se ao período anual de arrefecimento (6,7 meses).

4.1. Período de funcionamento

4.1.1. Set-point

O sistema de arrefecimento passivo do edifício poderá funcionar independentemente das condições térmicas no interior, ou quando se atinja uma dada temperatura. No caso desta última, recorreu-se, novamente, à norma europeia em que a temperatura máxima recomendada, mais restritiva na categoria em causa, é de 25,5°C [48]. Para este caso, o passivo funcionará quando a temperatura do edifício for superior a esta, e o ativo quando ultrapassar o limite da equação (3.1) - Figura 4.1.

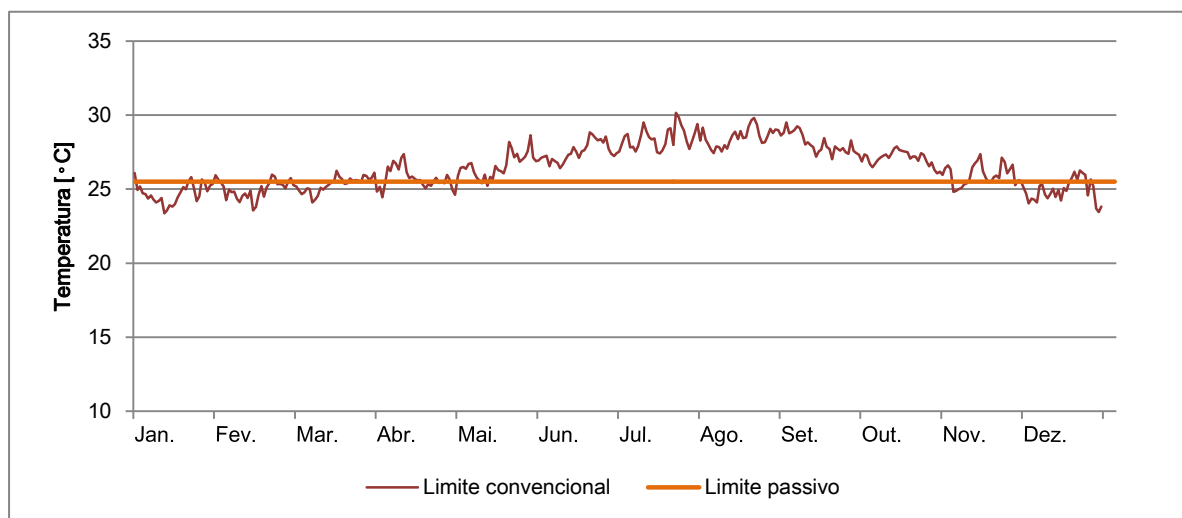


Figura 4.1 – Variação da temperatura média diária dos limites regulamentares ao longo do ano.

Visto que a área do elemento emissor ainda não foi definida, esta simulação será realizada para o valor máximo (100 m^2) que corresponde à área total da cobertura. Assume-se que o sistema auxiliar pode funcionar o dia todo, desconsiderando o período de ocupação.

Quando o sistema trabalha constantemente espera-se que o fluido absorva mais energia e por sua vez a temperatura aumente (Figura 4.2), promovendo maior dissipação para o céu noturno (Figura 4.3). No entanto verifica-se que a partir dum dado mês não existem diferença entre os dois casos em análise.

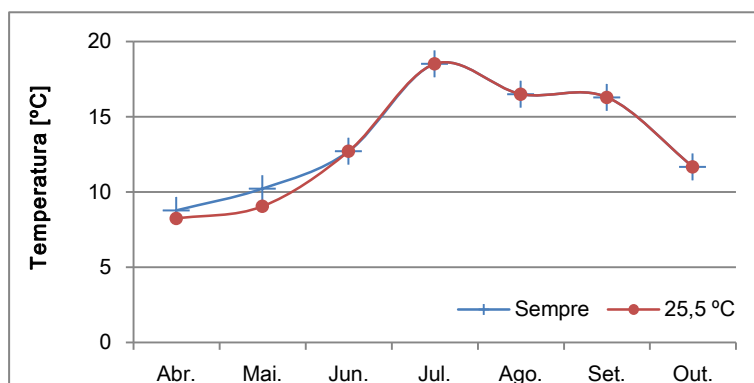


Figura 4.2 – Valor médio mensal da temperatura média do tanque no fim de um dia de trabalho.

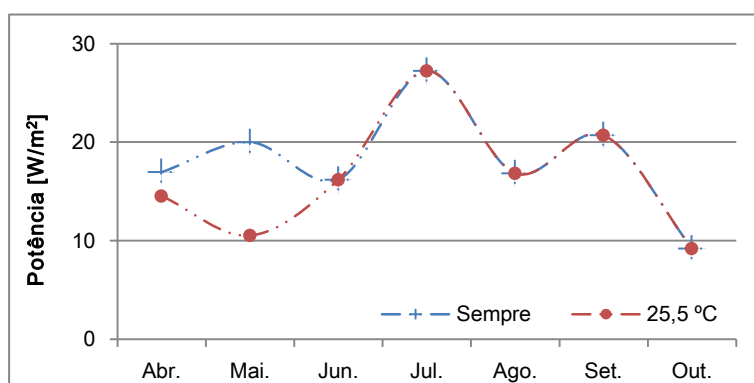


Figura 4.3 – Potência média anual dissipada por unidade de área.

Esta utilização contínua tem um ligeiro efeito na recorrência ao sistema convencional, reduzindo-o cerca de 1,8%, no entanto eleva o consumo elétrico das bombas em 41%. Sendo assim mais económico energeticamente recorrer ao sistema passivo com **set-point a 25,5 °C** - Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Ligação	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
Sempre	944	225	1169
25,5°C	961	160	1121

Desta análise verifica-se também que, a partir do mês de junho a energia absorvida do edifício pelo sistema auxiliar é a mesma (Figura 4.4). Concluindo assim que, o reservatório

absorve o máximo da energia, mesmo quando funciona apenas após os 25,5°C. Pois no outro caso este trabalha livremente, absorvendo sempre o máximo possível.

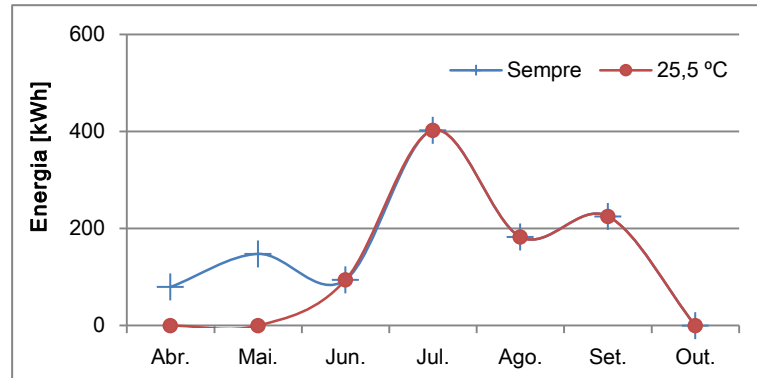


Figura 4.4 – Energia média absorvida do edifício pelo sistema passivo.

4.1.2. Horário de funcionamento

Esta análise determina se é mais vantajoso que o sistema de arrefecimento passivo opere o dia todo, ou apenas durante o período de ocupação. Novamente, esta simulação será realizada para 100 m² de elemento emissor.

Devido à utilização descontinuada do sistema, quando este trabalha apenas no período de ocupação, a temperatura do fluido no termoacumulador tende a ser inferior, o que promove menor dissipação para o céu.

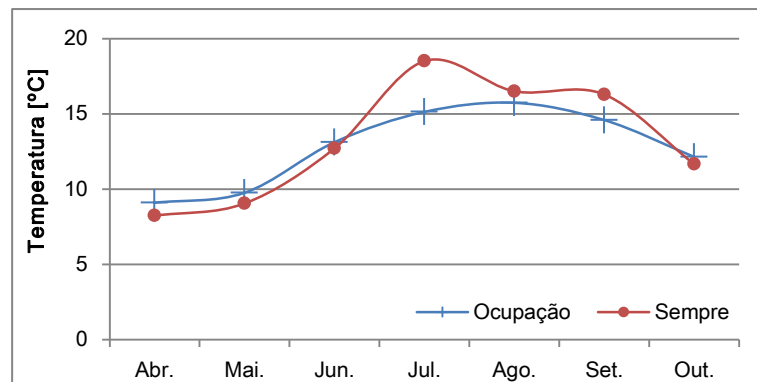


Figura 4.5 – Valor médio mensal da temperatura média do tanque no fim de um dia de trabalho.

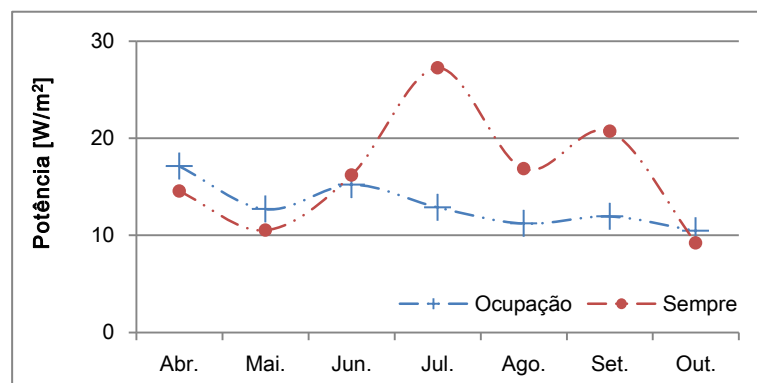


Figura 4.6 – Potência média anual dissipada por unidade de área.

A utilização contínua do sistema de climatização de apoio permite uma redução da temperatura ao longo do dia, o que reduz a utilização do convencional em 15%. Sendo assim mais vantajoso manter o passivo em funcionamento o dia todo, independentemente da ocupação - Tabela 4.2. Isto deve-se à inércia do edifício, que é contrariada pela capacidade de absorção contínua do fluido do termoacumulador.

Tabela 4.2 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Ligação	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
Ocupação	1131	120	1251
Sempre	961	160	1121

4.2. Área útil do elemento dissipativo

Antes de começar a otimização a escolha de parâmetros iniciais deve ser racional, e perto daquilo que será o ótimo. O primeiro fator a otimizar é o condicionante, visto que estes estão todos relacionados. Optou-se por iniciar com a otimização da área, tendo como limite a área da cobertura, pois não foram colocados impedimentos de custo inicial nem de atravancamento.

Nestas parametrizações pode escolher-se por fixar um valor de área e procede-se à otimização dos outros parâmetros, ou realizar-se uma análise das diferentes áreas possíveis, e determinar a mais vantajosa – opção escolhida. De modo a avaliar a área ideal para não sobredimensionar o sistema, a análise contempla uma larga gama de valores: 5, 20, 40, 50, 60, 80 e 100 m².

Com o aumento da área de coletores a temperatura média do reservatório tende a diminuir (Figura 4.7), o que influencia a potência dissipada por unidade de área (Figura 4.8) – esta diminui com a redução da temperatura do fluido, ou seja, com o aumento da área.

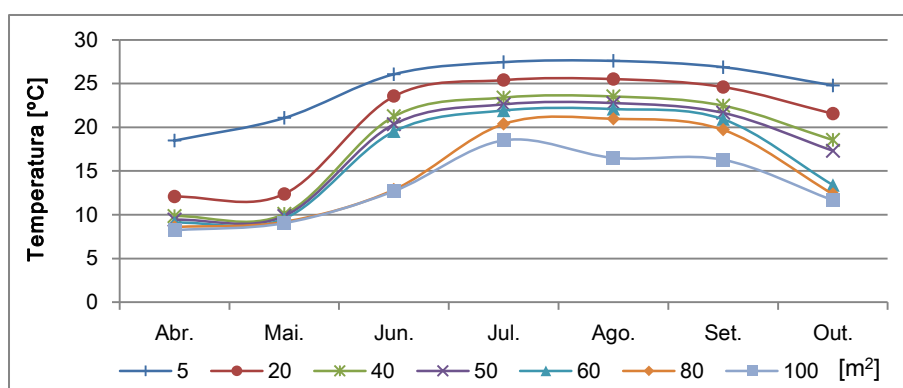


Figura 4.7 – Valor médio mensal da temperatura média do tanque no fim de um dia de trabalho.

Analisando a Figura 4.8 verifica-se que a potência média mensal dissipada por metro quadrado é superior para 5 m² (como esperado), atingindo os 66 W/m². No entanto a dissipada no total é muito inferior (Anexo página 91, Figura 7.20), e o fluido não atinge temperaturas suficientemente baixas para absorver a energia do edifício (Figura 4.9).

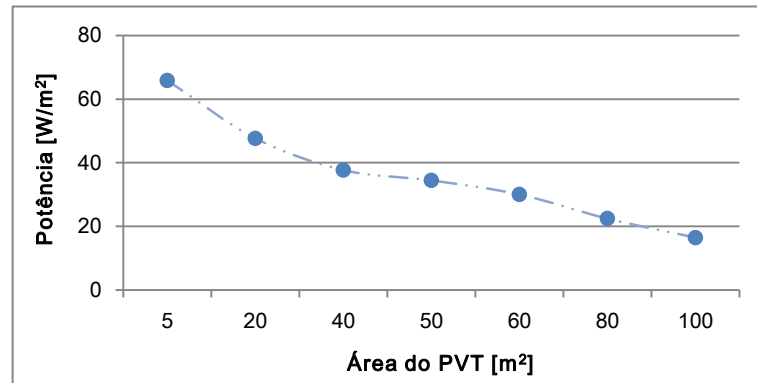


Figura 4.8 – Potência média anual dissipada por unidade de área.

Quando a área do elemento radiativo é muito baixa, a energia absorvida do edifício pelo sistema convencional é muito superior à do passivo, mas note-se que quando a área é muito elevada a absorção por parte do convencional volta a aumentar. Esse comportamento está relacionado com a temperatura do fluido, em que esta atinge temperaturas inferiores à temperatura de orvalho do edifício, e reduz o potencial de funcionamento do sistema passivo.

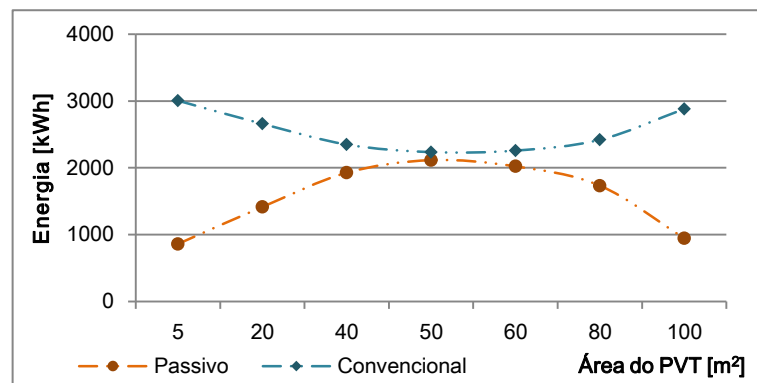


Figura 4.9 – Energia térmica absorvida pelo sistema passivo e convencional.

Com o aumento da área, os ganhos de energia elétrica continuam em crescimento, sendo o valor ótimo para área infinita. No entanto, o objetivo é minimizar a recorrência do sistema convencional assim como os consumos elétricos totais, concluindo que a área ótima é de 60m² (Tabela 4.3). Sendo esta a área utilizada para a otimização dos restantes parâmetros.

Tabela 4.3 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas, e energia obtida pelos coletores [kWh/ano].

Área [m²]	Consumo elétrico			Consumo Total
	Convencional	Bombas	Auxiliar AQS	
5	1002	284	377	1664
20	886	274	183	1343
40	783	267	177	1228
50	745	265	169	1179
60	753	247	159	1159
80	807	213	143	1163
100	961	160	129	1250

4.3. Otimização

4.3.1. Caudal de fluido

Através da variação do caudal de circulação nos painéis, tenciona-se analisar a evolução da potência média anual dissipada, assim como o potencial do sistema de climatização passivo, determinando a condição ótima.

No sistema dissipativo noturno, ao aumentar o caudal de circulação a temperatura do fluido diminui mais lentamente, promovendo menor dissipação de energia (Figura 4.10 e Figura 4.11). Quando o caudal é muito elevado o fluido arrefece ainda mais o que aumenta a utilização do sistema passivo nos meses críticos, o que conduz ao aumento da temperatura do tanque nesse período, refletindo-se na dissipação de energia térmica.

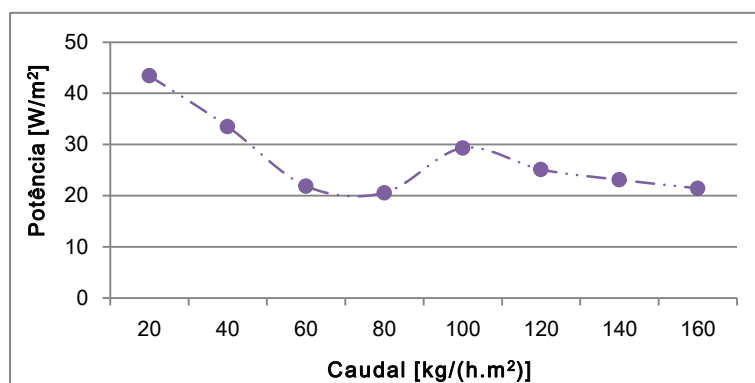


Figura 4.10 – Potência média anual dissipada por unidade de área para diferentes caudais de circulação.⁹

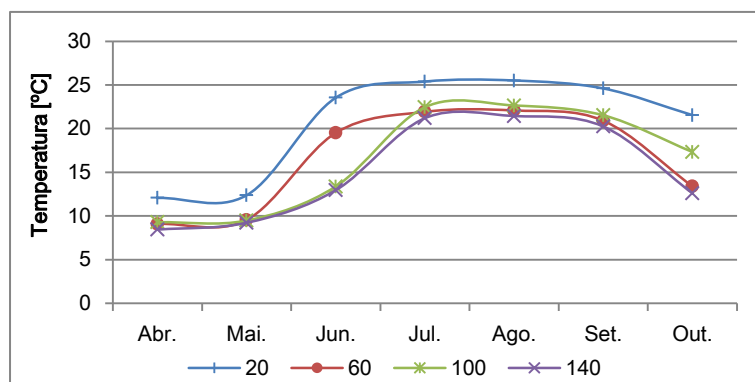


Figura 4.11 – Temperatura média mensal da temperatura média do tanque para diferentes caudais de circulação em cada PVT após um dia de trabalho.

Uma consequência das temperaturas do fluido serem tão baixas, para os caudais mais elevados, reflete-se na necessidade de recorrer ao sistema convencional por um período mais prolongado (Figura 4.12), apesar da vantagem nos meses críticos. Assim, torna-se necessário ter uma perspetiva anual dos consumos.

⁹ Para os caudais superiores ao máximo da bomba descritos na Tabela 2.3, página 23, alterou-se o valor máximo do caudal da bomba para 200kg/h.m², pois a temperatura do fluido aumenta e aumenta a temperatura do fluido, e por sua vez a potência dissipada.

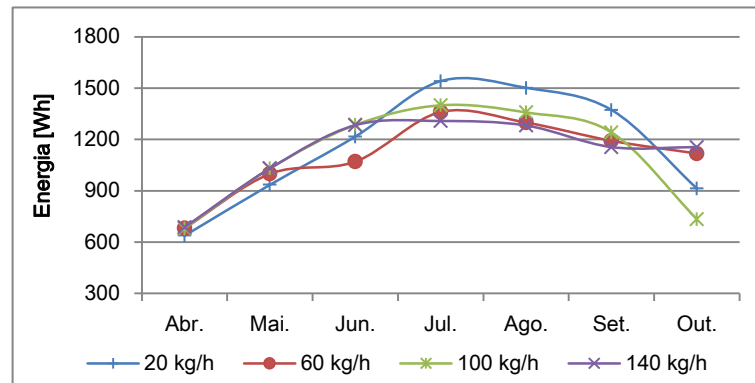


Figura 4.12 – Energia média mensal absorvida pelo sistema auxiliar conforme o caudal de circulação no PVT.

No que se refere à utilização de energia, Figura 4.13, verifica-se que o consumo das bombas de circulação tem uma tendência decrescente, por dois motivos: (1) a temperatura do fluido é cada vez mais baixa, então este absorve mais energia no mesmo intervalo de tempo (entre os 20 e os 60 kg/h.m^2 - Figura 4.14) e (2) a temperatura do fluido é tão baixa que o auxiliar deixa de funcionar devido a possibilidade de ocorrência de condensação (para caudais superiores a 80 kg/h.m^2).

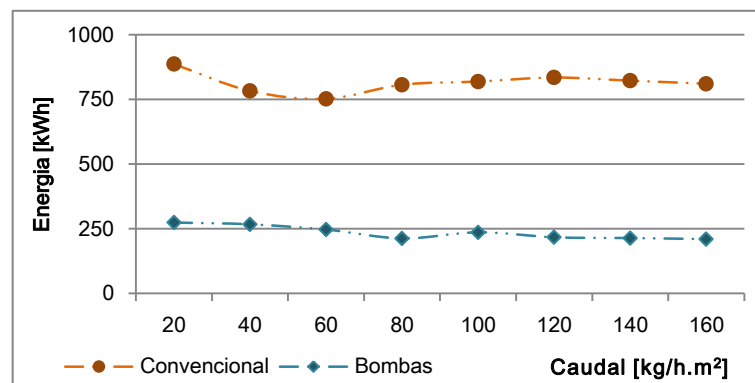


Figura 4.13 – Energia anual utilizada pelas bombas de circulação e sistema auxiliar.

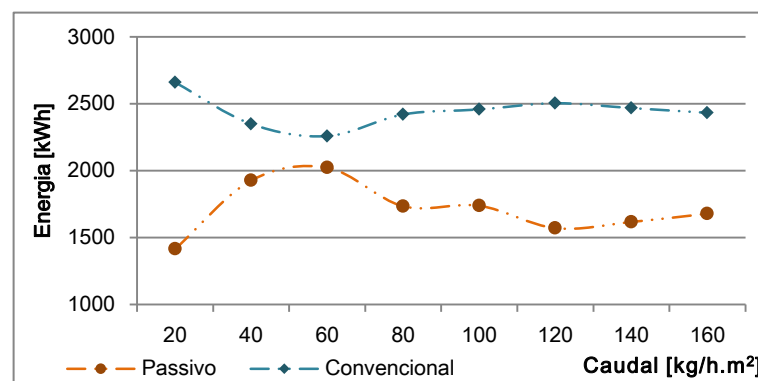


Figura 4.14 – Energia térmica absorvida pelo sistema passivo e convencional.

A energia térmica anual absorvida pelos sistemas utilizados encontra-se na Figura 4.14. Onde se verifica que a absorção por parte do passivo tem um pico nos 60 kg/h.m^2 , acabando por ter uma tendência oscilatória para caudais superiores. Este coincide com o mínimo dos

consumos totais - Tabela 4.4. Assim, verifica-se que o caudal mais vantajoso, no sistema com estas condições de funcionamento, é de **60 kg/h.m²** (0,0167 kg/s.m²).

Tabela 4.4 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Caudal [kg/h]	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
20	886	274	1161
40	783	267	1050
60	753	247	1000
80	807	213	1020
100	819	236	1056
120	835	217	1052
140	823	214	1037
160	811	210	1021

4.3.2. Percentagem de glicol no fluido

A variação da percentagem de glicol reflete-se na capacidade térmica do fluido, em que esta diminui com o aumento de glicol (anexo Tabela 7.14 página 91), diminuindo também a potência dissipada - Figura 4.15. A adição de glicol acaba por aumentar as perdas de carga da instalação, mas não é contabilizado na análise.

Quando se trata de água sem aditivos a potência dissipada é mínima, visto que possui mais capacidade térmica, arrefece mais rapidamente nos primeiros meses e tarda em recuperar pois acaba por não ser utilizado (anexos Figura 7.21, página 91).

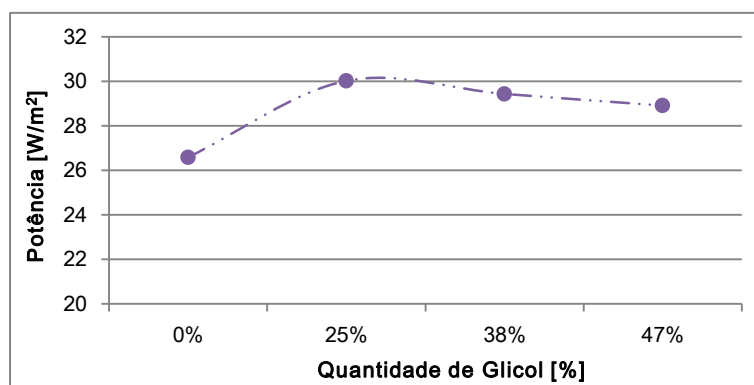


Figura 4.15 – Potência média anual dissipada por unidade de área para diferentes quantidades de glicol.

O impacto energético da variação da quantidade de glicol é muito baixo, quando esta é superior a 25 % (Figura 4.16), o que indica que a existência de glicol pouco influencia a eficiência do sistema radiativo.

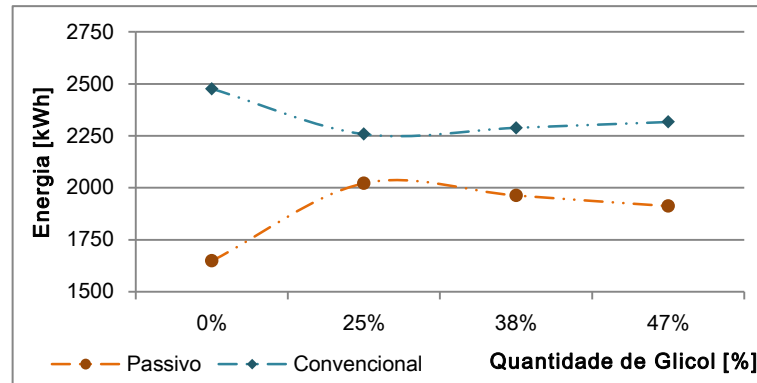


Figura 4.16 – Energia térmica absorvida pelo sistema passivo e convencional.

Recorrendo a uma análise simplificada, verifica-se que é mais vantajoso, a um nível energético, utilizar água com aditivos. Havendo ainda outras vantagens, tais como [52]:

- Evita o depósito de calcário promovendo a condutividade térmica;
- Promove no fluido alta capacidade de absorção e transporte de calor;
- É anticorrosivo.

Assim, o valor ótimo deste parâmetro é água com **25% de glicol** - Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Percentagem de glicol [%]	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
0	825	219	1045
25	<u>753</u>	247	1000
38	763	247	1010
47	772	247	1019

4.3.3. Tipo de ligação entre os coletores

A ligação entre os coletores tem influência na temperatura que o fluido atinge quando retorna ao reservatório. A ligação em série (Figura 4.17) permite que a mesma corrente de fluido circule por todos os coletores, baixando cada vez a mais temperatura (Figura 4.19). Na ligação em paralelo (Figura 4.18), o fluido passa em apenas um coletor o que se traduz numa maior dissipação térmica do que na ligação em série.



Figura 4.17 – Esquematização de coletores solares ligados em série. [54]



Figura 4.18 – Esquematização de coletores solares ligados em paralelo. [54]

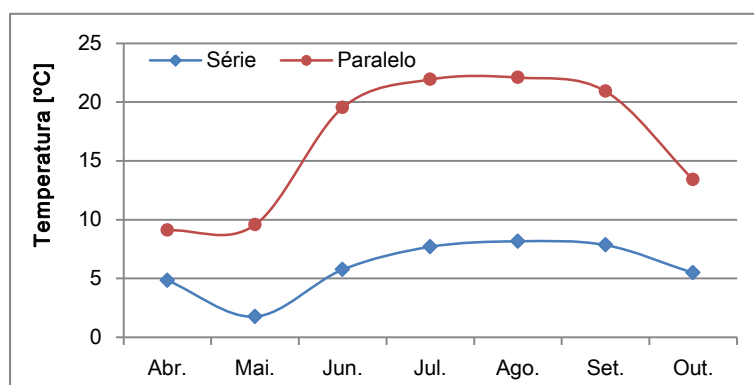


Figura 4.19 – Temperatura média mensal da temperatura média do tanque no fim de um dia de trabalho.

Devido à elevada diferença de temperatura média do fluido no reservatório é notória uma grande diferença da potência dissipada para o ambiente - Figura 4.20. Como o reservatório atinge temperaturas muito mais baixas, o sistema passivo se encontra desativado na maior parte do tempo, para prevenir a condensação. Assim, para o edifício em causa, tendo em conta as condições de funcionamento do sistema, é inviável ligar os coletores em série (Figura 4.21).

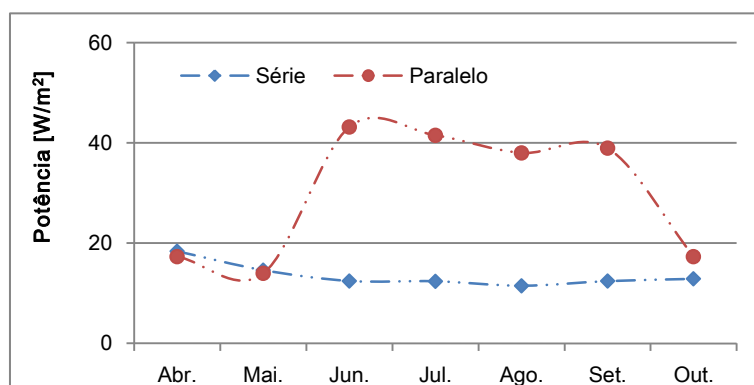


Figura 4.20 – Potência média mensal dissipada por unidade de área.

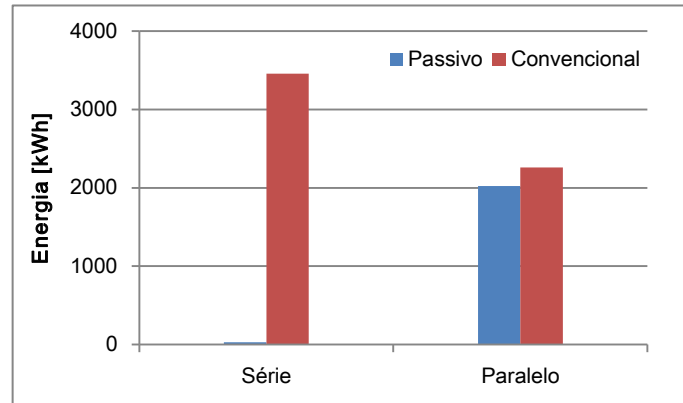


Figura 4.21 – Energia térmica utilizada para a climatização do edifício.

O consumo de eletricidade das bombas de circulação para o sistema em paralelo é superior, pois o sistema passivo é acionado com mais frequência. Em contra partida, o consumo do sistema convencional reduz cerca de 35%, demonstrando um grande impacto no consumo elétrico anual - Tabela 4.6.

É também necessário considerar o consumo do auxiliar de AQS para determinar a ligação mais vantajosa, pois esta também influencia a circulação do fluido durante o dia - Figura 4.2. Concluindo-se assim, para o caso em estudo, é mais vantajoso ligar os coletores em paralelo.

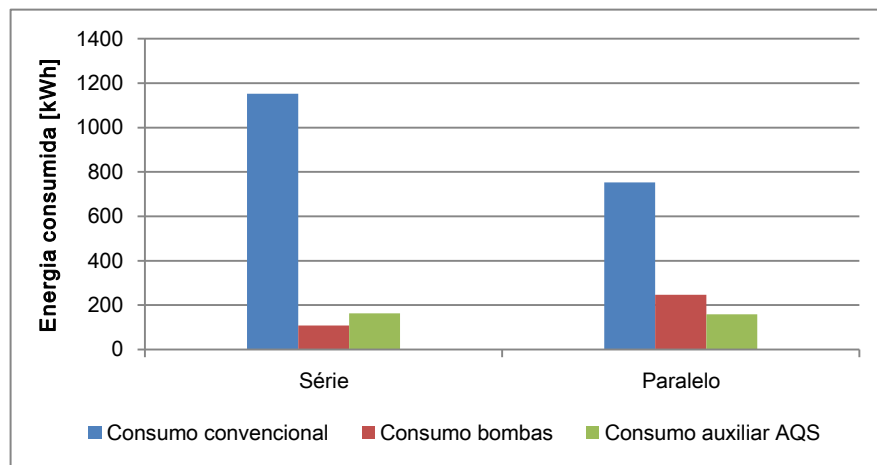


Figura 4.22 – Energia elétrica consumida pelo sistema convencional, pelas bombas de circulação e pelo auxiliar de AQS num ano.

Tabela 4.6 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Ligação	Consumo elétrico			Consumo Total
	Convencional	Bombas	Auxiliar AQS	
Série	1153	108	164	1425
Paralelo	<u>753</u>	247	159	1159

4.3.4. Inclinação do PVT

Para esta análise foram simuladas três situações distintas: (1) coletor na horizontal; (2) a mesma inclinação que a latitude; (3) inclinação 10° superior à latitude - considerada aquela que maximiza a obtenção média de eletricidade durante o ano [53].

Espera-se que a inclinação não exerça muita influência no que trata a energia dissipada pelo coletor, visto que a equação simplificada de Klein apenas contabiliza o efeito da inclinação no coeficiente de perdas convectivas (anexo **Equações de Klein**, página 76).

Ao analisar a potência média dissipada por unidade de área, verifica-se que esta é ligeiramente superior quando o coletor se encontra na horizontal (Figura 4.23). No entanto, trata-se de uma diferença quase insignificante.

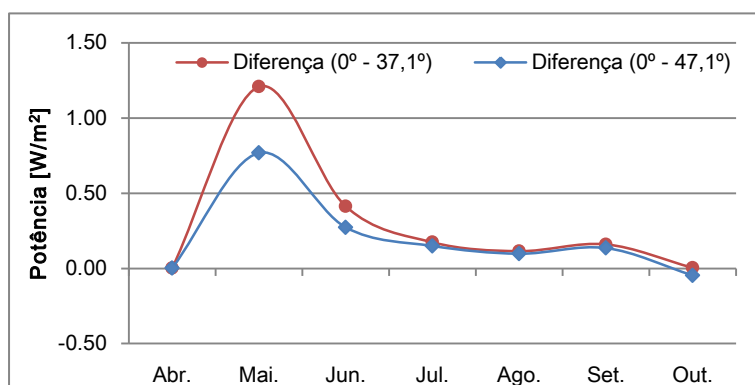


Figura 4.23 – Diferença da potência média por unidade de área.

A diferença de potência dissipada reflete-se na variação da temperatura do reservatório no fim de um dia de trabalho. Através da Figura 4.24 verifica-se que, de junho a setembro, quando o coletor se encontra na horizontal, proporciona uma temperatura do reservatório mais baixa em média $0,05^\circ\text{C}$ (tanto para $37,1^\circ$ como para $47,1^\circ$) – uma diferença irrelevante.

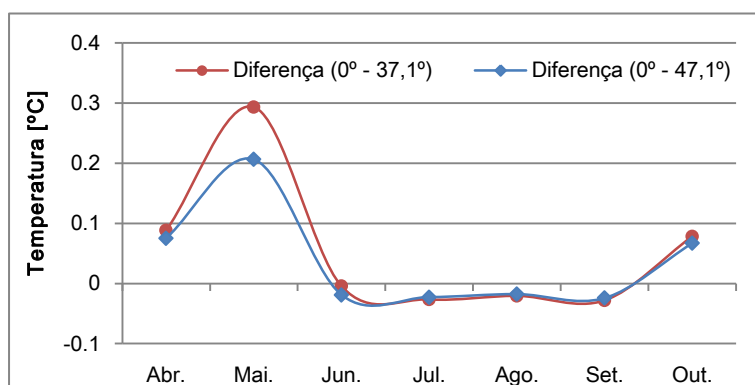


Figura 4.24 – Diferença da temperatura média do reservatório.

Devido à pouca diferença de temperatura do fluido nos três casos, a energia utilizada pela BC é quase a mesma para estes, assim torna-se indiferente a otimização deste parâmetro segundo o consumo elétrico do sistema convencional. No entanto, o objetivo é utilizar o PVT também para AQS, e neste caso já se verifica uma diferença mais significativa - Figura 4.25.

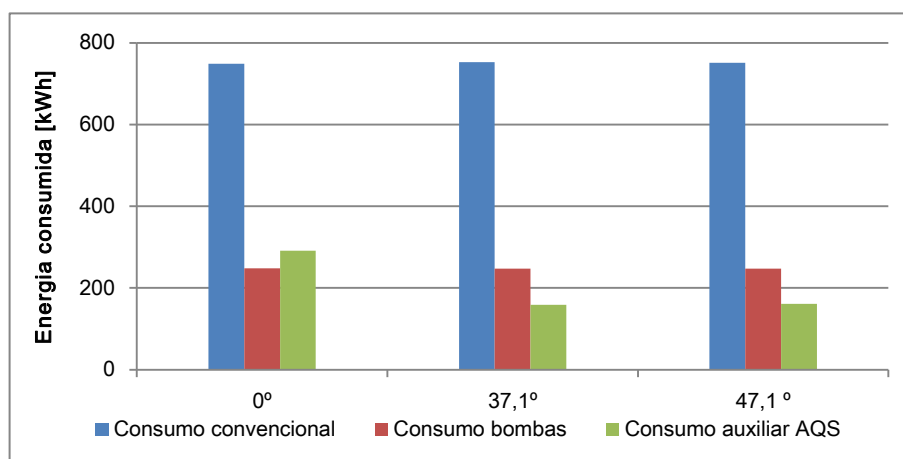


Figura 4.25 – Representação gráfica dos diversos consumos energéticos médios anuais.

Da Tabela 4.7 conclui-se que, apesar da utilização de energia do convencional ser ligeiramente inferior para os coletores na horizontal, é mais vantajoso economicamente posicionar os coletores fotovoltaicos com a mesma inclinação da latitude do local.

Tabela 4.7 – Energia utilizada pelo sistema auxiliar e pelas bombas, e o excesso de energia [kWh/ano].

Inclinação	Consumo elétrico			Consumo Total
	Convencional	Bombas	Auxiliar AQS	
0°	748,9	247,8	291	1288
37,1°	752,7	247,1	159	1159
47,1°	751,5	247,4	161	1160

4.3.5. Volume do reservatório

O volume do reservatório é um fator influente na flutuação de temperatura do fluido, para tentar abranger uma larga gama de volumes a análise é efetuada para 1, 3, 4, 5, 7 e 10 m³. Sendo focados três pontos da análise: (1) potência dissipada; (2) energia utilizada pelas bombas e pelo sistema convencional; (3) energia absorvida do espaço pelo passivo.

O diâmetro do tanque é constante, variando apenas a altura deste (anexo **Dimensões do reservatório** página 92), os níveis de estratificação tem sempre a mesma altura, sendo ao todo cinco.

Com o aumento do volume do termoacumulador, verifica-se que a temperatura média mensal do fluido sofre poucas alterações (Figura 4.26), tendo tendência crescente. Pois, quanto maior o volume, menor é a capacidade de arrefecimento dos painéis.

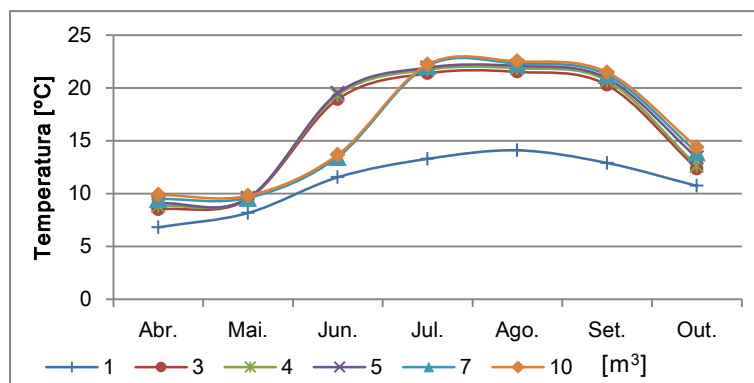


Figura 4.26 – Temperatura média mensal da temperatura média do tanque no fim de um dia de trabalho.

Nota-se que ao aumentar o volume do tanque (Figura 4.27) a energia absorvida pelo passivo é crescente atingindo o máximo entre os 3 e 4 m³. Para volumes superiores a 5 m³ o potencial térmico do fluido diminui, devido à baixa capacidade de dissipação para volumes tão elevados (existindo uma forte relação entre área e o volume).

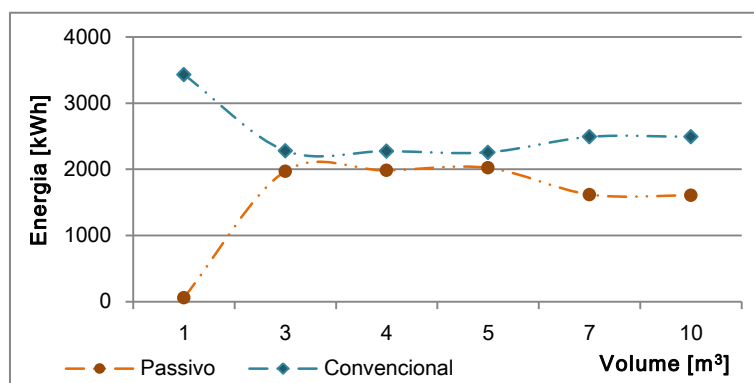


Figura 4.27 – Energia térmica absorvida pelo sistema passivo e convencional.

O aumento do volume até os 5 m³ mantém um potencial elevado para o arrefecimento por parte do sistema passivo, pois a temperatura do fluido é mais elevada (comparando com volumes inferiores), o que permite o funcionamento do sistema em períodos mais prolongados - Figura 4.28.

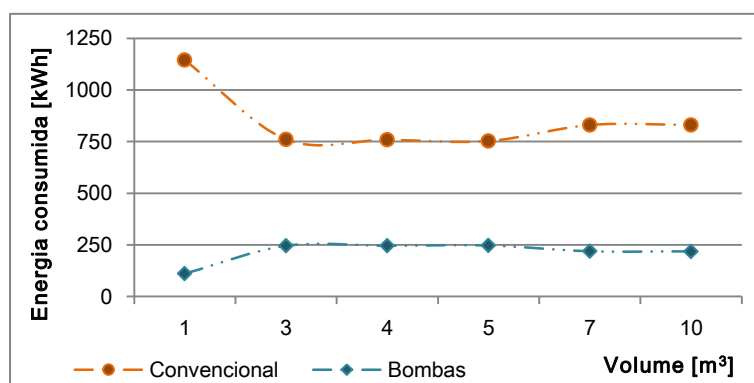


Figura 4.28 – Energia elétrica utilizada num ano pelo convencional e pelas bombas de circulação.

É realizada uma análise energética e económica de modo a determinar qual é o volume mais vantajoso para o edifício em causa. Concluindo-se assim, Tabela 4.8, que **5m³** é o volume mais favorável, pois para além de minimizar o consumo elétrico total é o que garante o menor consumo por parte do sistema convencional.

Tabela 4.8 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Volume do reservatório [m ³]	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
1	1144	111	1256
3	761	246	1007
4	758	246	1004
5	753	247	1000
7	830	219	1050
10	831	219	1050

4.3.6. Meio envolvente do reservatório

Um ponto interessante é conhecer a influência que o meio envolvente do reservatório pode ter sobre o sistema em geral. Apesar do reservatório possuir um revestimento de isolamento térmico existem perdas, ou ganhos, através da envolvente.

Tendo o ambiente exterior flutuações de temperatura mais marcantes que o interior, torna-se interessante determinar qual é a envolvente mais vantajosa. Não se pode olvidar que estas conclusões dependem estritamente da localização e do clima envolvente do edifício, já que uns climas são mais quentes ou mais frios.

Para a simulação em causa, nota-se que quando o termoacumulador se encontra no interior, o fluido atinge temperaturas ligeiramente mais baixas (Figura 4.29). Pois a temperatura do edifício é controlada, evitando picos de sobreaquecimento. Esta diferença de temperatura reflete-se na potência dissipada pelo radiativo, visto que a temperatura mais alta promove uma maior dissipação de energia (Figura 4.30).

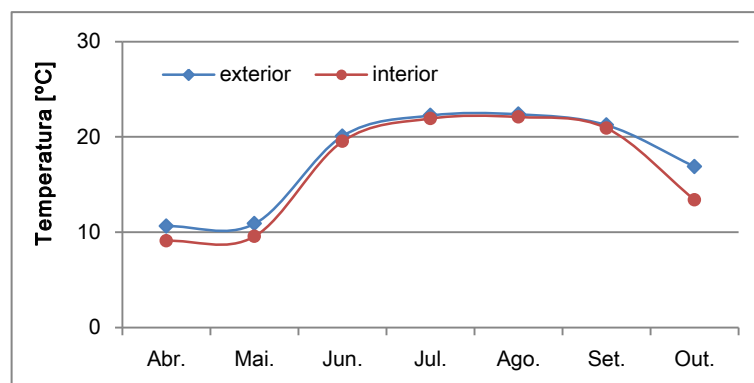


Figura 4.29 – Temperatura média mensal do fluido do reservatório no fim e um dia de trabalho.

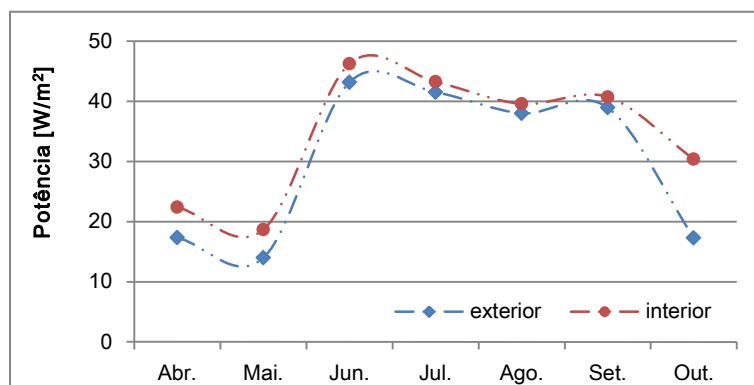


Figura 4.30 – Potência média mensal dissipada pelos coletores PVT por unidade de área.

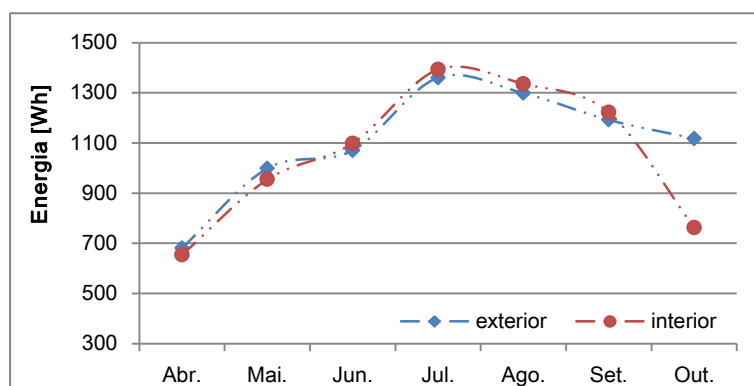


Figura 4.31 – Energia média mensal absorvida pelo sistema convencional.

A utilização de energia por parte do sistema convencional aumenta quando o reservatório se encontra no exterior (cerca de 4 %), pois o fluido tem uma temperatura mais elevada e não absorve tanta energia do edifício (Figura 4.31). No entanto trata-se de uma diferença residual, o que demonstra, que para um clima mediterrânico, a envolvente do reservatório não é um fator muito importante.

Analisando a utilização de energia por parte das bombas e do sistema convencional, verifica-se que se o reservatório se encontrar no interior do edifício existe menos custos energéticos.

Tabela 4.9 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

Localização do reservatório	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
interior	731	265	996
exterior	753	247	1000

4.4. Sistema otimizado

Em suma, os valores ótimos aplicados para a simulação final encontram-se descritos na Tabela 4.10, a única alteração desde os valores predefinidos inicialmente encontra-se na envolvente do reservatório.

Tabela 4.10 – Parâmetros para a otimização do sistema.

Parâmetro		Unidades
Área	60	m ²
Caudal	60	kg/h.m ²
Glicol	25	%
Tipo de ligação	Paralelo	-
Inclinação do PVT	37,1	°
Volume	5	m ³
Envolvente do reservatório	Interior	-

Estes dados foram obtidos considerando que a transferência de calor pelo teto radiante era apenas realizada através de radiação. No entanto, como já foi mencionado, 30% da troca ocorre por convecção. Contudo, esta diferença não altera o comportamento dos máximos calculados, apenas o valor absoluto.

Ao considerar o efeito convectivo o ar do edifício arrefece no instante, ao contrário do que acontece por radiação em que grande parte da energia é retida na inercia da envolvente. Desta forma, quanto maior o efeito convectivo menos energia é absorvida pela bomba de calor (demonstração em anexo **Efeito convectivo e radiativo**, página 93).

4.4.1. Resultados

A potência média dissipada durante o período de arrefecimento atinge os 35 W/m², sendo nos meses mais quentes (julho a setembro) de 41 W/m² - Figura 4.32. Verifica-se que, num mês, pode existir uma grande variação de potência dissipada, em particular nos meses mais frios, pois é quando o sistema de climatização passivo é iniciado havendo então mais gamas de temperatura ao longo do mês - Figura 4.33.

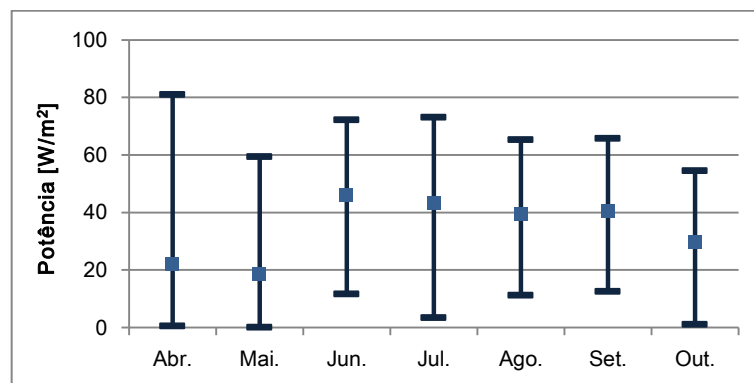


Figura 4.32 – Potência máxima, mínima e média mensal dissipada pelo PVT.

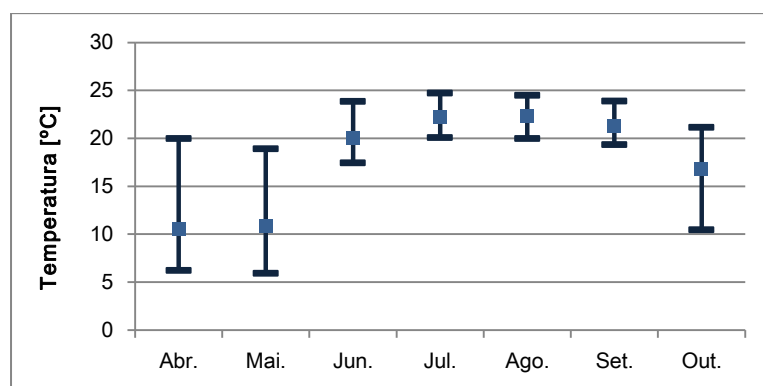


Figura 4.33 – Temperatura máxima, mínima e média mensal dissipada pelo PVT.

Visto que a gama de temperaturas dos primeiros meses é mais alargada, permite ao sistema que absorva mais energia do edifício, diminuindo a necessidade do sistema convencional. Na Figura 4.34 encontra-se a evolução da energia absorvida do edifício pelos sistemas acoplados (linha contínua) e apenas pelo convencional (linha a traço ponto). Verifica-se que, caso não se introduzisse o sistema passivo, o consumo da BC aumentaria consideravelmente no período crítico (julho e agosto).

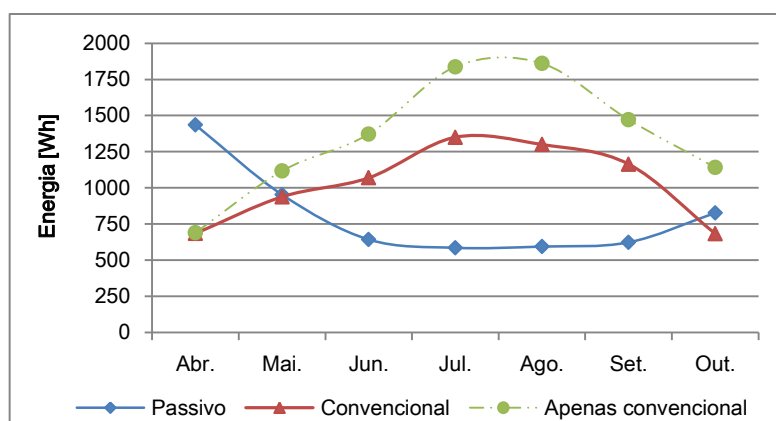


Figura 4.34 – Energia média mensal absorvida do edifício pelo sistema passivo e convencional de climatização.

A introdução do sistema passivo permite reduzir o consumo elétrico do convencional para 59% do valor obtido caso se utiliza-se apenas a bomba de calor. Ao contabilizar o consumo das bombas, esse valor cresce para 81%, demonstrando que ainda assim compensa a instalação do sistema híbrido. Para além disso, existe o benefício da utilização dos coletores PVT para a obtenção de água quente e de energia elétrica - Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Energia utilizada pelo sistema convencional, pelas bombas e auxiliar de AQS [kWh/ano].

Sistema	Consumo elétrico				Consumo Total
	Convencional	Aquecimento ambiente	Bombas	Auxiliar AQS	
Híbrido	<u>697</u>	169	264	159	1289
BC	1176	169	-	1912	3257

Para a determinação das necessidades primárias, quando se utiliza o sistema híbrido, realiza-se um balanço, contabilizando a energia obtida pelos PVT, as necessidades do edifício para climatização e AQS (Tabela 4.11), outras necessidades (2067 kWh/ano) e a energia exportada para a rede.

Da simulação, concluiu-se que, através do fotovoltaico, obtém-se 8936 kWh/ano de energia elétrica. Assumindo-se que 50% é comercializada para a rede, garantindo-se 4468 kWh/ano para consumo próprio. A determinação da energia líquida efetua-se segundo a expressão (4.1):

$$E = \text{Consumo líquido} - \text{Exportada} = [(1289 + 2067 - 4468) - 4468] \cdot 2,5 \quad (4.1)$$

$$= 0 \text{ kWh/ano}$$

Concluindo assim que, a necessidade de energia primária é de 0 kWh/(m².ano), uma redução bastante significativa, atingindo assim um edifício ZEB (com ligação à rede).

Note-se que ao realizar a otimização para um sistema similar com 25 m² é apenas 113 kWh/ano superior (3%), obtendo-se uma necessidade líquida de energia primária nula (página 97). Esta redução significativa permite minimizar o investimento inicial e manter a independência energética.

4.4.2. Sistema teórico – sem proteção de vidro

O sistema está otimizado tendo em conta que existe a proteção de vidro, no entanto é interessante conhecer até que ponto o sistema está a perder potencial caso fosse possível remover a cobertura. Esta análise será apenas comparativa, avaliando a distinção entre os resultados apresentados e aqueles que se obtiveram para um sistema equivalente sem proteção de vidro.

A existência de vidro com caixa-de-ar não ventilada serve para reduzir as perdas, assim ao remover essa cobertura espera-se obter temperaturas mais baixas no reservatório (Figura 4.35), e mais energia elétrica convertida pelo fotovoltaico. Em contra partida, a utilização do sistema auxiliar para o aquecimento de água aumenta.

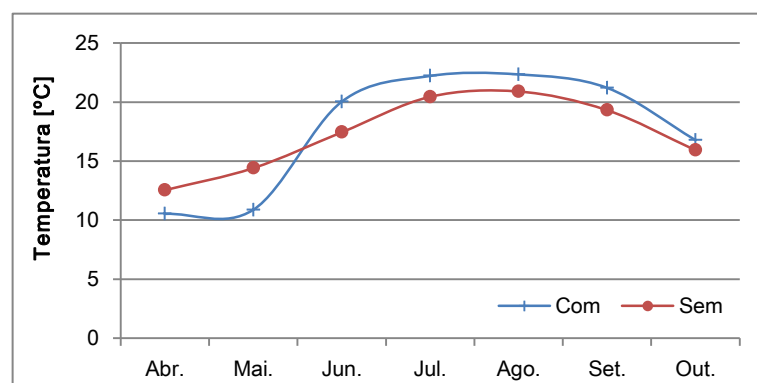


Figura 4.35 – Temperatura média mensal da temperatura média do reservatório.

Ao contrário dos casos anteriores, manter uma temperatura média do reservatório mais baixa não significa que a potência dissipada por unidade de área diminui-a. Pois, a remoção da caixa-de-ar, é como se se removesse um filtro de radiação infravermelha, o que aumenta a

potência dissipada, em média 45 % por ano, mesmo para temperaturas médias do fluido mais baixas.

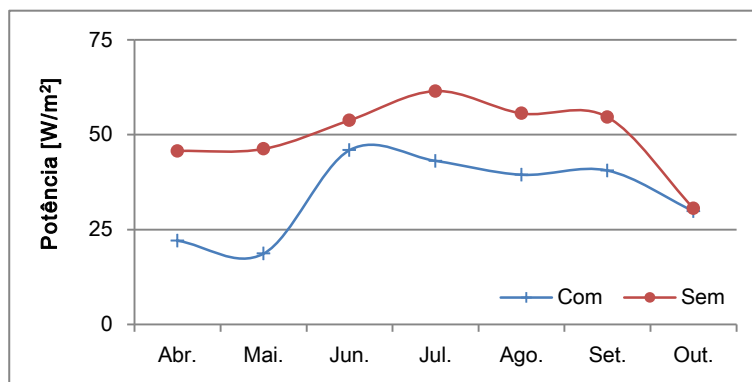


Figura 4.36 – Potência média mensal dissipada pelos coletores PVT por unidade de área.

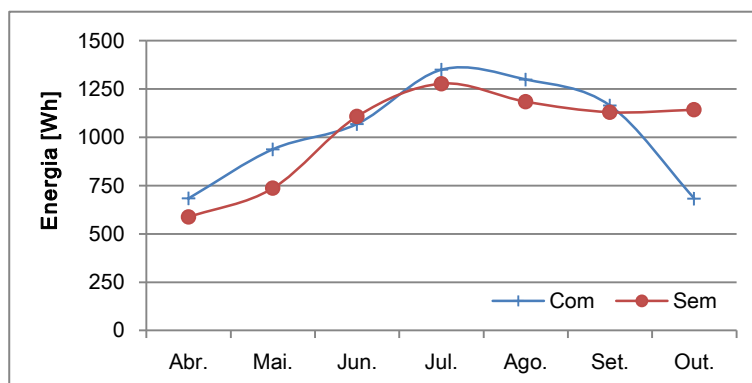


Figura 4.37 – Energia média mensal absorvida pelo sistema auxiliar.

A remoção do vidro tem pouca influência na utilização de sistema convencional (Figura 4.37). Sendo mais marcante na energia obtida pelas células fotovoltaicas, quando removida a cobertura, aumenta cerca de 13%.

Através da Tabela 4.12 verifica-se que, quando o coletor não possui cobertura de vidro, é necessário mais auxiliar para o AQS, havendo uma ligeira redução do consumo do convencional de arrefecimento. Concluindo-se que é mais vantajoso o sistema sem cobertura de vidro, visto que a energia em excesso é suficiente para cobrir o excesso do consumo do auxiliar de AQS.

Tabela 4.12 – Energia utilizada pelo sistema convencional, pelas bombas e auxiliar de AQS e energia obtida pelos coletores [kWh/ano].

Cobertura PVT	Consumo elétrico			Consumo total	Energia dos PVT
	Convencional	Bombas	Auxiliar AQS		
Sem	681	230	1009	1920	10087
Com	697	264	159	1120	8935

A Figura 4.38 representa o peso percentual dos consumos relativamente à energia elétrica convertida pelos coletores. Verifica-se assim, que o peso do consumo convencional é similar quando se remove a proteção de vidro. Concluindo que, segundo uma análise de arrefecimento, não existe vantagem significativa na remoção da cobertura. Numa análise global é mais vantajoso manter a cobertura.

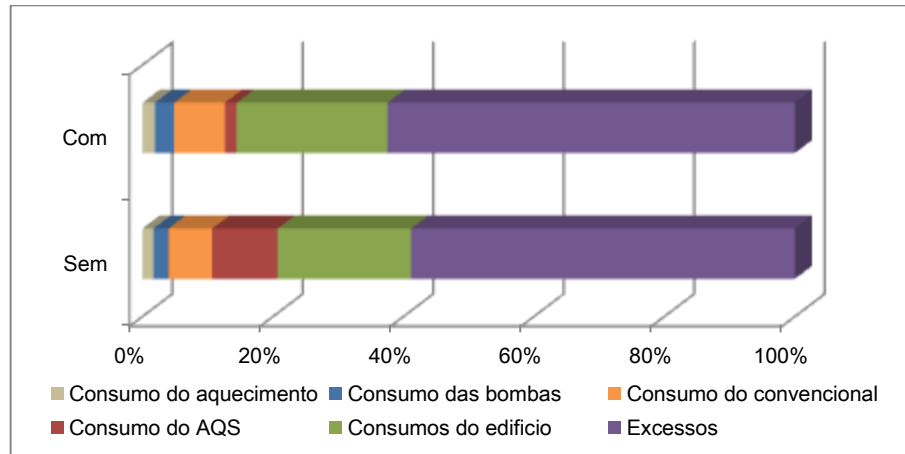


Figura 4.38 – Representação gráfica do balanço percentual de energia elétrica do edifício, considerando os diversos consumos.

Capítulo 5

*Conclusões e
trabalhos futuros*

Neste capítulo apresentam-se as conclusões finais do estudo e trabalhos futuros propostos para o desenvolvimento e aprofundamento da matéria apresentada.

5. Conclusões e trabalhos futuros

5.1. Conclusões

Os sistemas de arrefecimento passivos mais estudados que envolvam processos radiativos noturnos, incluem processos evaporativos, ou utilizam como painel radiativo um coletor solar simples modificado. Surge assim o interesse num equipamento comercial que permita arrefecer uma elevada massa de água, sem ser necessário recorrer a um investimento suplementar. Ao utilizar coletores fotovoltaicos térmicos é possível obter dois vetores energéticos distintos energia elétrica e térmica (arrefecimento e aquecimento).

O método para a determinação do coeficiente de perdas de calor através do painel fotovoltaico é o mesmo que é utilizado em coletores solares térmicos, sendo a sua adaptação uma das primeiras dificuldades encontradas, visto que as expressões existentes apenas contabilizam as perdas de calor para o ambiente, não considerando a temperatura radiativa do céu.

De modo a determinar a temperatura aparente do céu é necessário recorrer ao modelo físico que relacione as diversas propriedades, nebulosidade e emissividade, assim como a localização do sistema. Esta última permite determinar qual o clima predominante na zona em análise, que por sua vez influi nos resultados obtidos.

Uma outra dificuldade encontrada foi na aplicação do sistema no software escolhido, visto que este já contém módulos de rotinas pré-definidas. Assim, foi necessário estudar individualmente os módulos e verificar qual era o mais apropriado e ajustá-lo ao sistema descrito.

Na simulação realizada para um coletor fotovoltaico térmico com cobertura, com os parâmetros ótimos, a potência média anual dissipada ronda os 35 W/m², atingindo a média máxima mensal em junho de 43 W/m². Este resultado é acompanhado com uma capacidade de obtenção de energia elétrica de, aproximadamente, 8935 kWh/ano.

Na Tabela 5.1 encontra-se o resumo das potências referidas ao longo da revisão bibliográfica, assim como algumas condições de simulação (local e equipamento).

Tabela 5.1 – Resumo das potências obtidas em algumas experiências realizadas.

Ref.	Autor	Local	Potência média dissipada [W/m ²]	Equipamento	Ano
[9]	Erell, E. Etzion, Y.	Israel	81	Coletor térmico sem cobertura	1990
[10]	Dobson	Deserto de Namibe	60,8		2004
[11]	Ursula Eicker Antoine Dalibard	Madrid	65,6	Coletor PVT sem cobertura	2011
[22]	Yannas, S. Erell, E. Molina, J.L.	Sde Boker	100	Coletor de piscinas	1998
[12]	Beck, A. Büttner, D.	Würzburg	120	Tanque aberto - radiativo e evaporativo	2006

Da tabela, demonstra-se que os valores obtidos na simulação realizada são inferiores aos experimentais, no entanto, é necessário ter em conta que os coletores descritos na tabela são modificados, e os climas são particularmente secos, continentais e desérticos. Sem esquecer que existem outras diferenças como: área emissora, caudal e volume do termoacumulador.

Quando se recorre a painéis fotovoltaicos para suprir a necessidade de energia elétrica de um edifício, é necessária uma área elevada. Assim, se em todos os painéis existir circulação de água, possibilita-se a obtenção de uma elevada dissipação térmica durante a noite e água quente durante o dia, o que promove o aumento do rendimento fotolétrico. Não esquecer, que as necessidades de arrefecimento dependem do edifício e da localização deste. Conforme o clima envolvente a área necessária de painéis pode sofrer variações.

Dos diversos parâmetros analisados verificou-se que a percentagem de glicol, o tipo de ligação entre os coletores e a inclinação destes não são determinantes na quantidade de energia dissipada. Sendo o principal fator a temperatura do fluido, que pode ser influenciada pela área, caudal, volume do reservatório e meio envolvente deste.

Note-se que a energia dissipada não indica até que ponto o sistema é vantajoso, pois o interesse, neste caso, é manter o fluido a uma temperatura ligeiramente superior à de orvalho do edifício, mas que permita absorver o máximo de energia deste.

A dependência total de um sistema deste tipo não garante conforto térmico em todo o período, pelo menos com as especificações escolhidas. Assim sendo, recomenda-se que este seja utilizado como um complemento ao sistema convencional.

Ao utilizar um sistema de climatização híbrido, o consumo por parte da bomba de calor reduz –se em 41%, mesmo ao contabilizar o consumo das bombas. Globalmente, o sistema híbrido consome menos 18% de energia relativamente ao sistema convencional. O principal inconveniente de um sistema destes é o atravancamento e o custo de investimento.

Estes sistemas (PVT) podem aumentar a sua capacidade efetuando a remoção da cobertura de vidro, o que proporciona uma redução na utilização do convencional de 2,6%, e um aumento de 13% na energia elétrica convertida. No entanto, existe um aumento na necessidade de AQS de 535%.

Ao adicionar um sistema radiante através de painéis fotovoltaicos o edifício atinge o conceito de ZEB, devido às necessidades líquidas de energia primária serem nulas (essencialmente pelo elevado potencial de conversão de energia elétrica). Caso não fosse realizada essa adição essas necessidades seriam de 133 kWh/m².ano.

Ao reduzir a área emissora para 25 m², menos de metade, é possível minimizar o investimento e obter excedente energético para garantir um edifício ZEB. Havendo apenas 3% de aumento de consumo energético total, 12% no que corresponde o sistema convencional e 1% nas bombas.

5.2. Trabalhos futuros

Ao desenvolver do trabalho diversas questões foram notadas que podem ser mais estudadas ou melhoradas como continuação do tema. Podendo-se salientar as seguintes:

- Quando o fluido tem uma temperatura muito baixa pode misturar-se com um outro fluido de temperatura mais elevada para o sistema continuar a funcionar;
- Estudo do sistema numa placa simples, analisando o diâmetro do tubo e a distância entre eles que otimizem as perdas;
- Realizar a análise do ciclo de vida do sistema;
- Realizar um estudo experimental de um sistema tendo como elemento emissor:
 - PVT;
 - Coletor solar térmico com e sem cobertura;
 - Coletor solar de piscinas;
 - Placa de PVF com cobertura de Polietileno.

Referências

6. Referências

- [1] N. V. Baker, *Passive and low energy building design for tropical Island climates*. London: Commonwealth Secretariat, 1987.
- [2] INE, "Consumo de Energia no Sector Doméstico," ed, 2010.
- [3] D. G. d. E. e. Geologia, "Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico - 2010," ed, 2011.
- [4] EDP, "Rotulagem energia elétrica," ed, 2011.
- [5] S. Oxizidis and A. Papadopoulos, "Performance of radiant cooling surfaces with respect to energy consumption and thermal comfort," *Energy and buildings*, pp. 199-209, 2013.
- [6] A. Argiriou, M. Santamouris, and D. N. Assimakopoulos, "Assessment of the radiative cooling potential of a collector using hourly weather data," *Energy*, vol. 19, pp. 879-888, // 1994.
- [7] M. Santamouris, *Passive cooling of buildings*. London: James & James, 2007.
- [8] B. Juchau, "Nocturnal and conventional space cooling via radiant floors," presented at the International Passive and Hybrid Cooling Conference, Miami Beach, 1981.
- [9] E. Erell and Y. Etzion, "A Radiative Cooling System Using Water as a Heat Exchange Medium," *Architectural Science Review*, vol. 35, pp. 39-49, 1992/06/01 1992.
- [10] R. T. Dobson, "Thermal modelling of a night sky radiation cooling system," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 16, pp. 20-32, 2005.
- [11] U. Eicker and A. Dalibard, "Photovoltaic thermal collectors for night radiative cooling of buildings," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1322-1335, 2011.
- [12] A. Beck and D. Büttner, "Radiative cooling for low energy cold production," presented at the Proceedings of the annual building physics symposium, 2006.
- [13] D. S. Parker, "Theoretical evaluation of the nightcool nocturnal radiation cooling concept," 2005.
- [14] F. P. Incropera, *Fundamentos de transferência de calor e de massa* vol. 5ª ed 0009. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007.
- [15] C. N. Awanou, "Radiative cooling by a diode roof," *Solar and Wind Technology*, vol. 3, pp. 163-172, // 1986.
- [16] Infrared-thermography. (26 Fev 2013). *Emissivity Values for Common Materials*. Available: <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>
- [17] B. I. Solar. (27 Fev 2013). *An Initial Test of a Simple, Nighttime, Evaporative+Radiation Cooling Panel - Solar Heating and Cooling System With the Same System*. Available: <http://www.builditsolar.com/Experimental/RadiationCool/EvapRad.htm>
- [18] Evyatar Erell and Yair Etzion, "Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors," *Building and environment*, vol. 35, pp. 297-305, 2000.
- [19] E. Erell and Y. Etzion, "Heating experiments with a radiative cooling system," *Building and Environment*, vol. 31, pp. 509-517, // 1996.
- [20] F. A. Peuser, K. H. Remmers, and M. Schnauss, *Solar thermal systems: successful planning and construction*: Solarpraxis, 2002.
- [21] Wikipédia. (16 Mar. 2013). *Condutividade térmica*. Available: http://pt.wikipedia.org/wiki/Condutividade_térmica
- [22] S. Yannas, E. Erell, and J. L. Molina, *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*: Earthscan, 2006.

- [23] S. Catalanotti, V. Cuomo, G. Piro, D. Ruggi, V. Silvestrini, and G. Troise, "The radiative cooling of selective surfaces," *Solar Energy*, vol. 17, pp. 83-89, // 1975.
- [24] DuPont™. (3 Mar 2013). *DuPont™ Tedlar® PVF Films and Adhesives*. Available: http://www2.dupont.com/Tedlar_PVF_Film/en_US/
- [25] S. Zhang and J. Niu, "Cooling performance of nocturnal radiative cooling combined with microencapsulated phase change material (MPCM) slurry storage," *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 122-130, // 2012.
- [26] M. Al-Nimr, M. Tahat, and M. Al-Rashdan, "Night cold storage system enhanced by radiative cooling - a modified Australian cooling system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, pp. 1013-1026, // 1999.
- [27] ESRU. (26 Fev 2013). *Solar Collectors*. Available: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/02-03/zero_emission_bldgs/descripsolarcollectors.htm
- [28] U. Eicker and A. Dalibard, "Photovoltaic-thermal collectors for night radiative cooling of buildings," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 1322-1335, // 2011.
- [29] REHVA, "How to define nearly net zero energy buildings nZEB," *REHVA Journal*, 2011.
- [30] A. J. Marszal, P. Heiselberg, J. S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, *et al.*, "Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 971-979, 4// 2011.
- [31] IEE, *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)*, 2010.
- [32] Igor Sartori, Assunta Napolitano, and Karsten Voss, "Net zero energy buildings: A consistent definition framework," *Energy and buildings*, vol. 48, pp. 220-232, 2012.
- [33] M. software. (15 Abr 2013). *Meteonorm*. Available: <http://meteonorm.com/>
- [34] S. World. (21 Mai. 2013). *Clima no Algarve*. Available: <http://www.strawberry-world.com/pt/portugal/algarve/media-climatica.html>
- [35] "RCCTE - Versão provisória," ed, (talvez) 2014.
- [36] *Temperaturas exteriores de projecto e números de graus-dias*. Lisboa: INMG/LNEC, 1989.
- [37] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar energy thermal processes*. New York: Wiley, 1974.
- [38] Y. R. Sekhar, K. V. Sharma, and M. B. Rao, "Evaluation of heat loss coefficients in solar flat plate collectors," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 4, 2009.
- [39] H. Dagdougui, A. Ouammi, M. Robba, and R. Sacile, "Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Tétouan (Morocco)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 630-638, 1// 2011.
- [40] O. Kusyi and A. Dalibard, "Different methods to model thermal stratification in storage tanks," ed. Danmarks Danmarks Tekniske Universitet, 2007.
- [41] TRNSYS, "Mathematical Reference," vol. 5, 2007.
- [42] J. E. B. Nelson, A. R. Balakrishnan, and S. Srinivasa Murthy, "Parametric studies on thermally stratified chilled water storage systems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, pp. 89-115, // 1999.
- [43] H. Garg, S. Mullick, and V. K. Bhargava, *Solar thermal energy storage*: Springer, 1985.
- [44] (20 Mar. 2013). *Circulating Pumps - Catalog*. Available: <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/micro-dc-hot-water-solar-circulating-pumps-670473437.html>

-
- [45] Fritz Kasten and Gerhard Czeplak, "Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud," *Solar energy*, vol. 24, pp. 177-189, 1980.
- [46] B. Chen and e. all, "MEASUREMENT OF NIGHT SKY EMISSIVITY IN DETERMINING RADIANT COOLING FROM COOL STORAGE ROOFS AND ROOF PONDS."
- [47] Marlo Martin and Paul Berdahl, "Characteristics of infrared sky radiation in the United States," *Solar energy*, vol. 33, pp. 321-336, 1984.
- [48] "Indoor Environmental Criteria - EN 15251," E. Standard, Ed., ed, 2007.
- [49] F. Systems, "Carat Chilled Beam - Operation & Maintenance," ed.
- [50] F. Systems. (25 Jun. 2013). *Radiant Heating Design Principles*. Available: <http://www.buildingdesign.co.uk/mech-technical/frenger-t1/frenger-radiant-heating.htm>
- [51] UniverSolar, "Catálogos de produtos," ed.
- [52] WURTH, "Glicol Solar," ed.
- [53] A. Oliveira, "Radiação Solar," ed: Métodos Computacionais de Eng. Térmica, 2012.
- [54] D. Esquemas. (31 Mar. 2013). Available: <http://dicasesquemas.blogspot.pt/2013/03/ligacao-entre-coletores-paineis-solares.html>
- [55] H. Gonçalves, "Em direcção aos Edifícios de Balanço Energetico Zero," ed: Ordem dos Engenheiros, 2011.
- [56] E. Maldonado and J. L. Alexandre, "Edifícios/sistemas eficientes (low energy buildings) e NetZEBs," ed: Climatização, 2012.
- [57] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, *Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações*: McGraw-Hill, 2007.
- [58] C. A. P. d. Santos, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios versão actualizada 2006* vol. 6a ed 0009. Lisboa:: LNEC, 2007.
- [59] ADENE, "Projecto de Verificação do RSECE " in *CENTRO DE DIA*, ed.
- [60] (18 Mar 2013). *Properties of mixture Water/Glycol*. Available: <http://detector-cooling.web.cern.ch/detector-cooling/data/Table%208-3-1.htm>
-

Anexos

7. Anexos

I. nZEB e ZEB

Na Figura 7.1 encontra-se um gráfico que diferencia os edifícios ZEB dos nZEB. Os edifícios que se encontram sobre a linha azul são considerados ZEB pois, a sua capacidade de obtenção de energia de fontes renováveis (Fornecimento de energia) equilibra a utilização que estes têm da rede (Procura de energia). A linha a vermelho representa o limite para ser considerado nZEB.

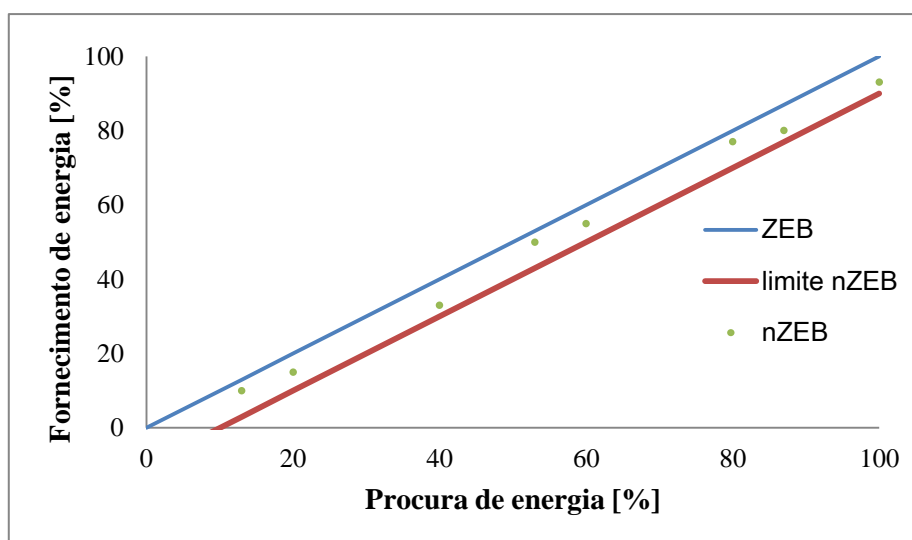


Figura 7.1 – Relação entre a procura e a obtenção de energia de fontes renováveis de um ZEB e o limite inferior do nZEB. [55]

O limite a vermelho da figura não tem um valor definido, encontra-se em estudo e provavelmente estará disponível na próxima regulamentação portuguesa. No entanto, é possível prever que esse limite deverá estar dentro daquilo que hoje é qualificado como edifício A+ - Figura 7.2. [56]

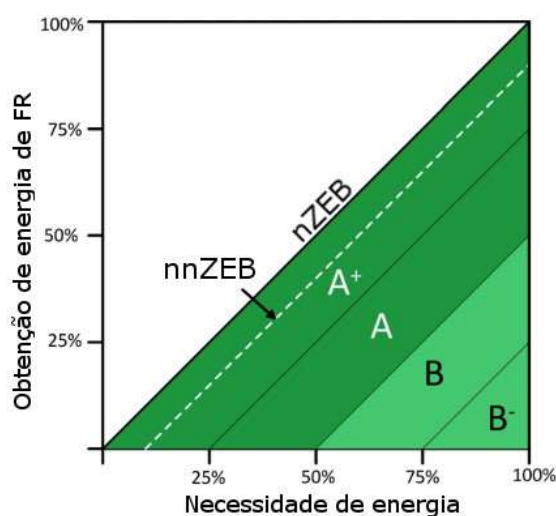


Figura 7.2 – Qualificação energética dos edifícios. [56]

II. Cálculos auxiliares ao modelo

Equações de Klein

A nova equação de Klein (7.1) é válida para uma temperatura média da placa até 200 °C com um erro de $\pm 0,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

$$U_t = \left[\frac{N_v}{\frac{C_k}{T_{p;m}} \cdot \left(\frac{T_{p;m} - T_\infty}{N_v + F_k} \right)^{F_{k;T}}} + \frac{1}{U_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_{p;m} + T_\infty) \cdot (T_{p;m}^2 + T_\infty^2)}{(\varepsilon_p + 5,91 \times 10^{-3} \cdot N_v \cdot U_w)^{-1} + (2 \cdot N_v + F_k - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p) \cdot \varepsilon_v^{-1} - N_v} \quad (7.1)$$

$$C_k = 520 \cdot (1 - 5,2 \times 10^{-5} \cdot \beta) \text{ para } 0^\circ < \beta < 70^\circ, \text{ quando } \beta > 70^\circ \text{ usar } \beta = 70^\circ \quad (7.2)$$

$$F_k = (1 + 8,9 \times 10^{-2} \cdot U_w - 0,1166 \cdot U_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 7,866 \times 10^{-2} \cdot N_v) \quad (7.3)$$

$$F_{k;T} = 0,43 \cdot (1 - T_{p;m}^{-1} \times 10^2) \quad (7.4)$$

Existe ainda a equação de Klein simplificada (equação (7.5)), que tem um erro de $\pm 0,25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, relativamente à nova equação de Klein, e é válida para $U_w < 40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. [38]

$$U_t = \left[\frac{N_v}{\frac{C_k}{T_{p;m}} \cdot \left(\frac{T_{p;m} - T_\infty}{N_v + F_k} \right)^{0,33}} + \frac{1}{U_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_{p;m} + T_\infty) \cdot (T_{p;m}^2 + T_\infty^2)}{(\varepsilon_p + 0,05 \cdot N_v \cdot (1 - \varepsilon_p))^{-1} + (2 \cdot N_v + F_k - 1) \cdot \varepsilon_v^{-1} - N_v} \quad (7.5)$$

$$C_k = 365,8 \cdot (1 - 8,83 \times 10^{-3} \cdot \beta + 1,298 \times 10^{-4}) \text{ para } 0^\circ < \beta < 70^\circ, \text{ quando } \beta > 70^\circ \text{ usar } \beta = 70^\circ \quad (7.6)$$

$$F_k = (1 - 4 \times 10^{-2} \cdot U_w + 5 \times 10^{-4} \cdot U_w^2) \cdot (1 + 9,1 \times 10^{-2} \cdot N_v) \quad (7.7)$$

Fator de remoção de calor

Com: $U_{tot} = U_t + U_{inf} + U_{lat}$.

O F_R , conhecido por fator de remoção de calor, depende das propriedades do coletor, assim como do fluido utilizado, e é dado pela equação (7.8) [37]. Para a obtenção deste fator é necessário conhecer as dimensões do coletor (Figura 7.3 e anexos **Características do painel fotovoltaico** página 78).

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_{pvt} \cdot U_{tot}} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{A_{pvt} \cdot U_{tot} \cdot F_{\eta;pvt}}{\dot{m} \cdot C_p} \right) \right] \quad (7.8)$$

É também, necessário determinar: o fator de eficiência do coletor (7.9) e o fator de eficiência das alhetas (7.10) [14, 18, 37].

$$F_{\eta;pvt} = \left\{ U_{tot} \cdot W \cdot \left[(U_{tot} \cdot [D + (W - D) \cdot F_{\eta;alh}])^{-1} + \frac{e_{bond}}{l_{bond} \cdot \lambda_{bond}} + (\pi \cdot D_{int} \cdot U_{f;int})^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (7.9)$$

$$F_{\eta;alh} = 2 \cdot [m \cdot (W - D)]^{-1} \cdot \tanh \left[m \cdot \frac{W-D}{2} \right] \quad \text{Com:} \quad m = \sqrt{\frac{U_{tot}}{\lambda_{alh} \cdot e_{alh}}} \quad (7.10)$$

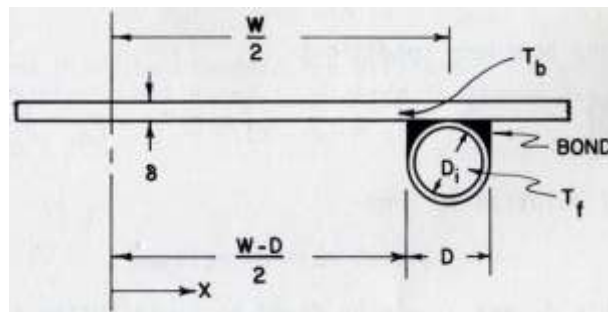


Figura 7.3 – Esquematização da ligação entre o tubo e a placa do coletor fotovoltaico. [37]

Pressão atmosférica

Para a determinação da pressão atmosférica utiliza-se a equação (7.11):

$$p_{\infty} = p_{ho} \cdot \exp \left(- \frac{g \cdot \rho_{ho} \cdot h}{p_{ho}} \right) \quad (7.11)$$

Esta equação resulta da equação dos gases perfeitos (7.12) [57] e da relação da variação da pressão com a altitude (7.13) [57]. Na equação (7.13) substitui-se a massa específica pela equação (7.12) e integra-se, tendo como limites: a pressão no nível do mar (p_{ho}) e a pressão para a altitude desejada (p_{∞}).

$$\rho_{ho} = \frac{p_{ho}}{R \cdot T_{ho}} \quad (7.12)$$

$$\frac{dp}{dh} = -\rho_{ho} \cdot g \quad (7.13)$$

III. Características do painel fotovoltaico



CERTIFICAÇÕES :

- CE.
- ISO 9001:2000.



Características

- Células de alta eficiência de conversão.
- Camada anti-reflectora aplicada à superfície frontal dando uma aparência escura e uniforme.
- Diodos Bypass para evitar o efeito de sombras.
- Vidro temperado com baixo conteúdo em ferro e elevada transmissibilidade.
- Capta a luz através da sua avançada estrutura de célula em tecnologia monocristalina.
- Resistente caixa de alumínio anodizado para suportar fortes ventos e cargas de neve.
- A parte traseira da caixa está equipada com orifícios de drenagem. Com isto elimina-se o risco de que a água da chuva ou neve possa acumular-se.

Especificações

- Célula: silício monocristalino (125x96 mm)
- Número de células: 72(8x9)
- Dimensão dos módulos (mm): 1068x934x35
- Peso (kg): 11.7
- Garantia da potência: 20 anos (80%), 10 anos (90%)
- Garantia de produto: 2 anos

REFERÊNCIA Universolar		10010210/102350	10010210/102351
REFERÊNCIA		IBMQ-130/24	IBMQ-130/12
Potência pico (Wp)	W	130	130
Voltagem a circuito aberto (Voc)	V	43,5	21,75
Voltagem a potência máxima (Vmp)	V	35,66	17,83
Corrente de curto-circuito (Isc)	A	4,18	8,36
Corrente a potência máxima (Imp)	A	3,65	7,3
Rendimento do módulo	%	13	13
Voltagem de aplicação em corrente contínua		24V	12V
Limitações			
Temperatura de operação		de -40 a 85 °C	
NOCT		45 ± 2 °C	
Tolerância à potência		± 6,65 %	
Coefficiente corrente/temp	%/°C	0,065 ± 0,015	
Coefficiente voltagem/temp	%/°C	-0,38	

STC: Irradiação: 1000 W/m²; Temperatura del módulo: 25 °C, AM=1,5
 NOCT: Temperatura de operação nominal da célula.

Figura 7.4 – Catálogo com as propriedades escolhidas para o coletor fotovoltaico.

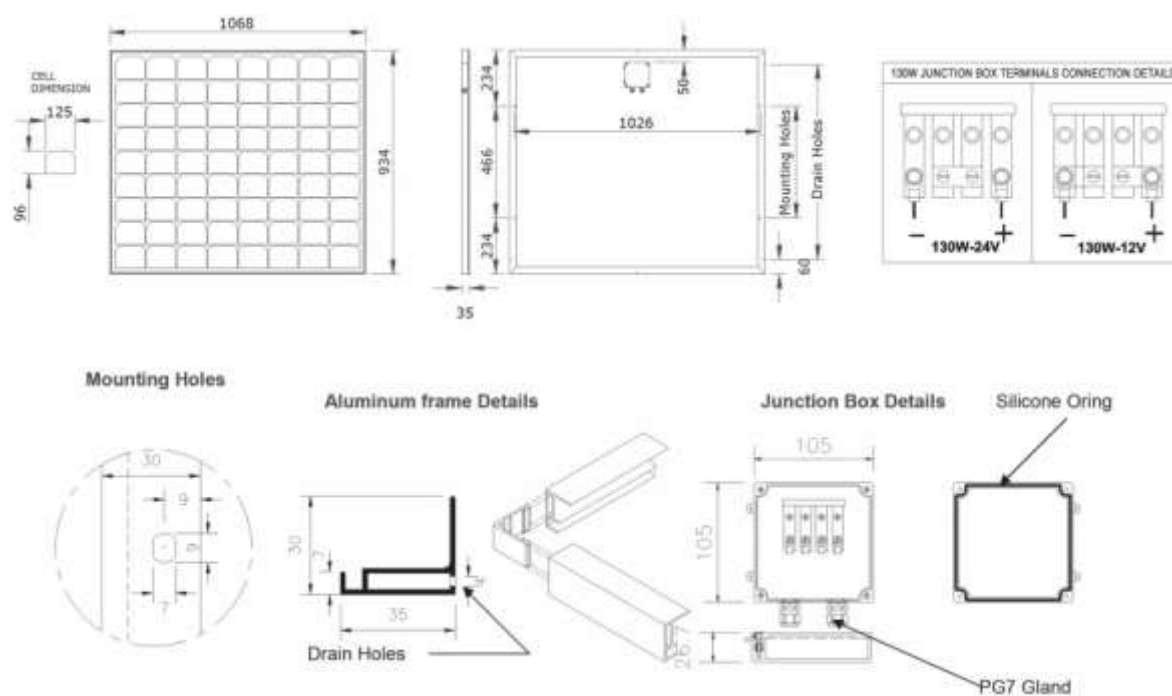


Figura 7.5 – Dimensões do coletor fotovoltaico em análise e pormenores. [51]

Tabela 7.1 – Áreas relevantes.

A_{lat}	0,1023 m
$A_{pvt;útil}$	0,8640 m
Rácio áreas	0,8662

IV. Modelação no TRNSYS

A Figura 7.6 representa as ligações entre os diversos módulos utilizados no TRNSYS, e estão evidenciados os componentes equivalentes aos representados no esquema da Figura 2.1 (página 19) – PVT, bomba de circulação, reservatório e edifício (inclui a BC). Devido à complexidade dos módulos optou-se por agrupar segundo o objetivo dos módulos - Figura 7.7

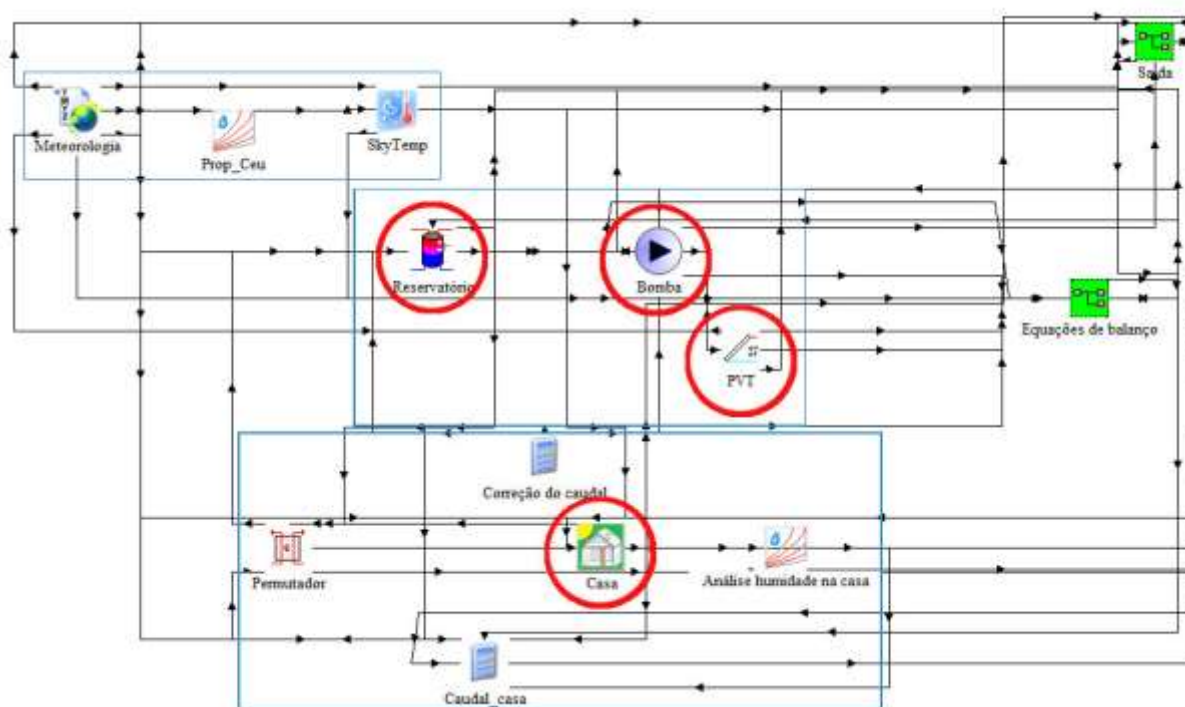


Figura 7.6 – Representação da ligação entre os blocos mais importantes do TRNSYS.

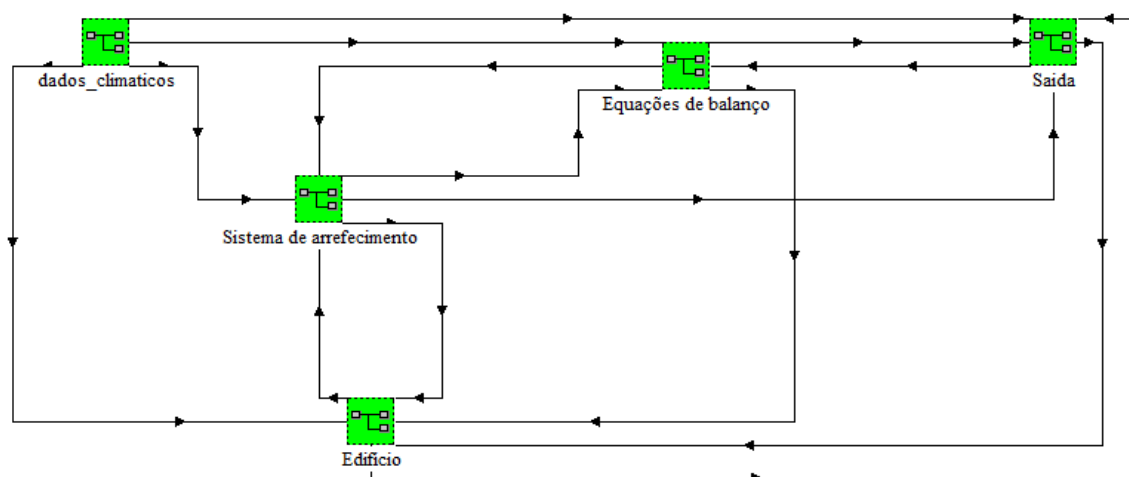


Figura 7.7 – Representação dos grupos de módulos no TRNSYS.

Dos diversos módulos utilizados alguns são a representação direta dos componentes físicos, ou determinam as propriedades do meio envolvente, e outros são a introdução manual de algumas relações matemáticas apresentadas no capítulo **Modelação matemática do sistema**, página 19.

Os dados de entrada de cada módulo dependem das ligações e das especificações que forem definidas pelo utilizador - alguns desses dados já foram apresentados na **Descrição do sistema** página 19.

As tabelas que se seguem apresentam cada um dos módulos descrevendo a sua funcionalidade e qual o componente real que representam. Existem dois grupos que não estão apresentados módulo a módulo na figura, nem nas tabelas, pois um deles é composto por equações matemáticas (Equações de balanço) que corrigem a equação de Klein (como explicado) e o outro é apenas tratamento de dados para exportação (Saída).

Tabela 7.2 – Módulos do TRNSYS que representam matematicamente o componente real.

Type	Nome	Componente	Grupo
50b	PVT	Coletor fotovoltaico híbrido	Sistema de arrefecimento
3	Bomba	Bomba de circulação	
60f	Reservatório	Termoacumulador	
56b	Casa	Casa + sistema BC (quando necessário)	Edifício

Tabela 7.3 – Modelação manual dos controladores do sistema radiativo e de arrefecimento.

Nome	Objetivo	Grupo
Correção do caudal	Determinar o caudal conforme a área de emissor e define se existe caudal ou não – controlador que verifica a leitura da radiação solar.	Sistema de arrefecimento
Caudal_casa	Controlador do sistema de climatização passivo, verifica a temperatura de bolbo seco e de orvalho do edifício e determina se existe caudal para o teto radiante.	Edifício

Tabela 7.4 – Módulos do TRNSYS que se determinam valores aproximados da envolvente.

Type	Nome	Objetivo	Grupo
33	Análise humidade na casa	Determinar o ponto de orvalho hora a hora no interior do edifício	Edifício
91	Permutador	Simula o teto radiante como se fosse um permutador com 100% de eficiência	
109	Meteorologia	Leitura dos dados climáticos	
33	Prop_Ceu	Determina as propriedades psicrométricas do céu	dados_climaticos
69	SkyTemp	Determina a temperatura e a nebulosidade do céu	

V. Consumos elétricos médios

Segundo o INE [3], o consumo médio de eletricidade de um edifício típico português é de 3450 kWh/ano. Dos diversos consumos do edifício apenas serão contabilizados os referentes à cozinha (36,9%), equipamentos elétricos (16,3%) e iluminação (6,7%) - Figura 1.2 página 4. Pois os restantes (AQS, arrefecimento e aquecimento ambiente) serão determinados pela simulação.

Assim conclui-se que os consumos elétricos do edifício em estudo são aproximadamente 59.9% de 3450 kWh/ano, 2067 kWh/ano.

VI. Ganhos internos

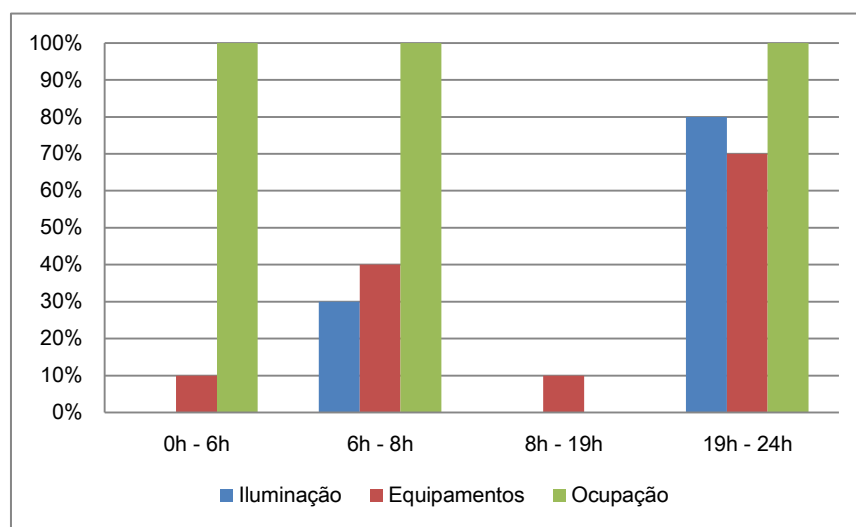


Figura 7.8 – Representação dos diversos perfis: de iluminação, equipamentos e ocupação, de segunda a sexta-feira.

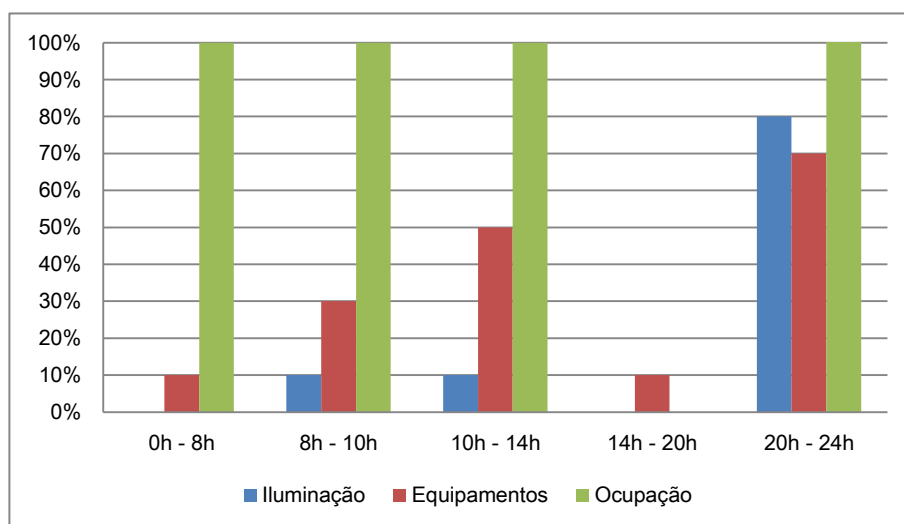


Figura 7.9 – Representação dos diversos perfis: de iluminação, equipamentos e ocupação, durante o sábado e o domingo.

VII. Envolvente exterior

Opaca vertical

Tabela 7.5 – Constituição da envolvente opaca vertical exterior. [58]

Constituição	Espessura [m]	λ [W/(m K)]	R [(m ² K)/W]	Página ITE	P [kg/m ³]	m _t [kg/m ²]
1 Acab. Int. + Reboco	0,02	1,3	0,015	I.7	1900	38
2 Tijolo 11	0,11	-	0,270	I.12	1000	110
3 Cx. Ar	0,03	-	0,180	I.11	1,2	0,036
4 Wallmate (XPS)	0,03	0,037	0,811	I.3	30	0,9
5 Tijolo 15	0,15	-	0,390	I.12	1000	150
6 Reboco	0,02	1,3	0,015	I.7	1900	38
Total	0,36		1,68			336,936
					Msi	148

Tabela 7.6 – Resistência térmica superficial do elemento, e coeficiente de transmissão térmica total. [35]

Resistência térmica total	
R _{se}	0,04
R _{si}	0,13
R _{parede}	1,68
U [W/(m ² .°C)]	0,54

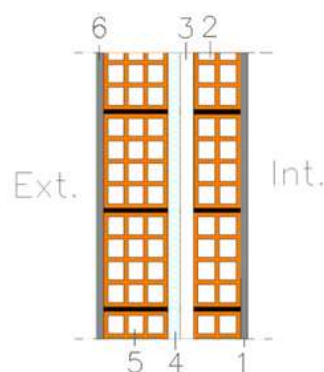


Figura 7.10 – Esquematização da envolvente vertical. [59]

Contato com o solo

Tabela 7.7 – Constituição da envolvente opaca vertical exterior. [58]

Constituição	Espessura [m]	λ [W/(m K)]	R [(m ² K)/W]	Página ITE	P [kg/m ³]	m _t [kg/m ²]
1 OSB	0,015	0,13	0,115	1.8	650	9,75
2 Betonilha regular.	0,04	1,3	0,031	1.7	1000	40
3 Massame	0,1	1,3	0,077	1.7	2000	200
4 Brita	0,15	2	0,075	1.9	2000	300
5 Tout-venant	0,15	2	0,075	1.9	2200	1001
Total	0,455		0,37			1550,75
		U [W/(m ² K)]	2,68		Msi	150

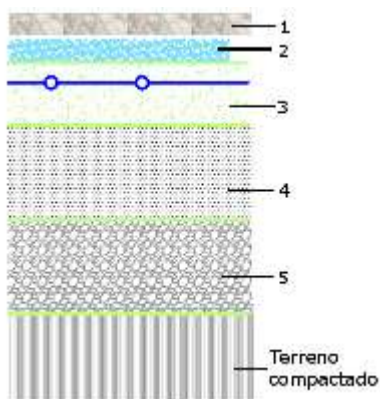


Figura 7.11 – Esquematização do pavimento em contato com o solo.

Cobertura exterior

Tabela 7.8 – Constituição da envolvente opaca vertical exterior. [58]

Constituição	Espessura [m]	λ [W/(m K)]	R [(m ² K)/W]	Página ITE	ρ [kg/m ³]	m_t [kg/m ²]
1 Reboco e acab.	0,02	1,3	0,015	1.7	1900	38
2 Lage de cobertura	0,2	1,65	0,121	1.5	2300	460
3 Roofmate (XPS)	0,06	0,037	1,622	1.3	30	1,8
- Tela	-	-	-	-	-	-
4 Betonilha de regularização	0,1	1,3	0,077	1.7	2400	240
5 Ladrilhos	0,01	0,92	0,011	1.4	1000	10
Total	0,39		1,85			749,8
					Msi	150

Tabela 7.9 – Resistência térmica superficial do elemento, e coeficiente de transmissão térmica total. [35]

Resistência térmica total	
R_{se}	0,04
R_{si}	0,1
$R_{cobertura}$	1,85
U [W/(m ² .°C)]	0,50

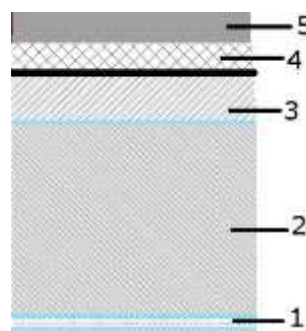


Figura 7.12 – Esquematização da cobertura exterior.

Pontes térmicas lineares

Tabela 7.10 – Resumo das pontes térmicas lineares consideradas para o edifício. [35]

Pontes térmicas lineares	B [m]	Ψ [W/m.K]
Ligação de fachada com pavimento térreo	40	0,7
Ligação de fachada com cobertura	40	0,7
Ligação de duas paredes verticais	12	0,5
Ligação de caixilharia	128	0,3
Ligação com caixa de estore	51,2	0,3
Total		115,76 W/°C

Os valores adotados para o coeficiente de transmissão térmica linear são os definidos pelo RCCTE quando não há informação suficiente sobre os elementos da envolvente. [35]

No que trata os elementos em contato com o solo, é considerado que existe isolamento (floormate) perimetral com 30 mm de espessura, e 1,5 m de comprimento. O comprimento típico é dado pela equação (7.14), obtendo-se $B = 5$ m, e com a resistência de $0,26 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ obtém-se $U = 0,52 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Contabilizando um fator de perda de 52 W/K (para uma área útil de 100 m^2).

$$B = \frac{2 \cdot A_u}{Per} \quad (7.14)$$

A consideração das PTL com a envolvente em contato com o solo resulta de 168 W/K .

Envidraçados

Tabela 7.11 – Fator solar do envidraçado selecionado.

Vidro		0,75
Vidro com proteção 100% - Inverno		0,02
Verão	Sul	0,31
	Este/oeste	0,24
	Norte	0,75

O fator solar de inverno é igual ao do vidro, pois não se considera que existam proteções solares permanentes. Para o verão é necessário contabilizar a proteção e a orientação do envidraçado. A proteção (Tabela 7.11) é obtida recorrendo à equação (7.15) e a de verão à equação (7.16), o fator de orientação encontra-se na Tabela 7.12. [35]

$$g_{\perp;ps} = g_{\perp;env} \cdot \prod \frac{g_{\perp;ps;j}}{0,75} \quad (7.15)$$

$$g_{\perp;verão} = F_{ori} \cdot g_{\perp;ps} + (1 - F_{ori}) \cdot g_{\perp;env} \quad (7.16)$$

Tabela 7.12 – Fator de correção do fator solar do envidraçado. [35]

Norte	Sul	Este/oeste
0	0,6	0,7

Inércia

Tabela 7.13 – Valores de massa superficial útil e de inércia.

Elemento construtivo	Massa superficial útil (M_{si}) [kg/m^2]	Fator de correção (r)	Área da sup. interior (S_i) [m^2]	$M_{si} \cdot r_i \cdot S_i$ [kg]
Paredes exteriores	148	1	120,00	17760
Coberturas	150	1	100,00	15000
Pavimentos	150	1	100,00	15000
Total [kg]				47760
Área pavimento [m^2]				100
Inércia térmica [kg/m^2]				478
INÉRCIA FORTE				

Segundo o regulamento RCCTE [35], quando a inércia térmica toma valores superiores a 400 kg/m^2 a inércia da envolvente é *forte*.

VIII. Comportamento energético

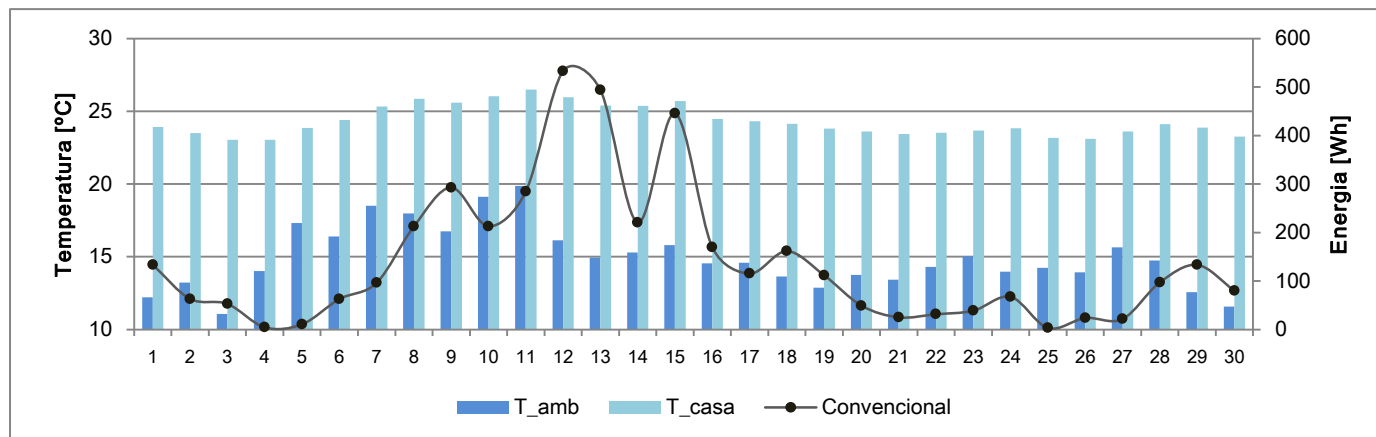


Figura 7.13 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de abril.

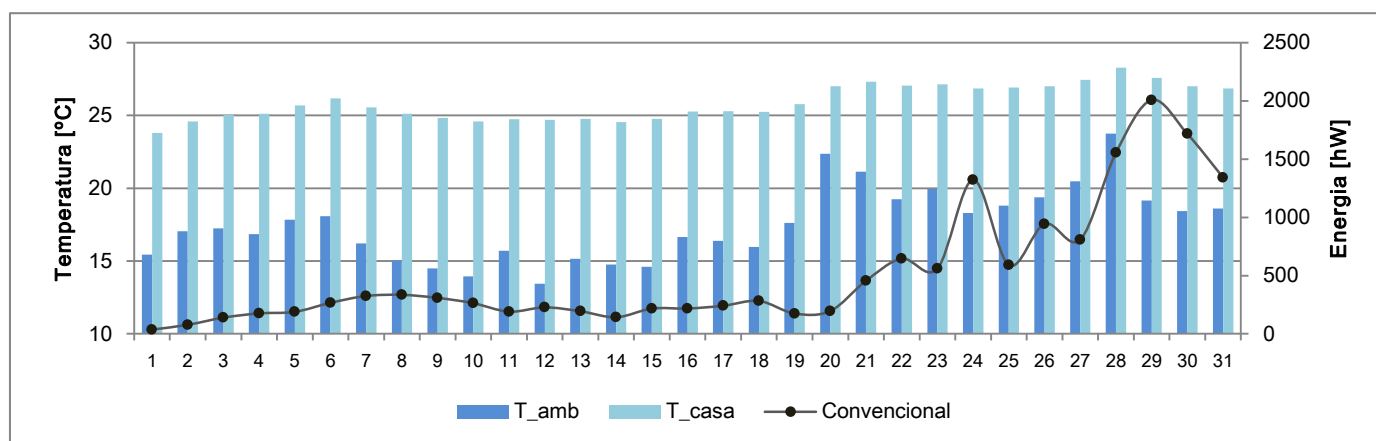


Figura 7.14 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de maio.

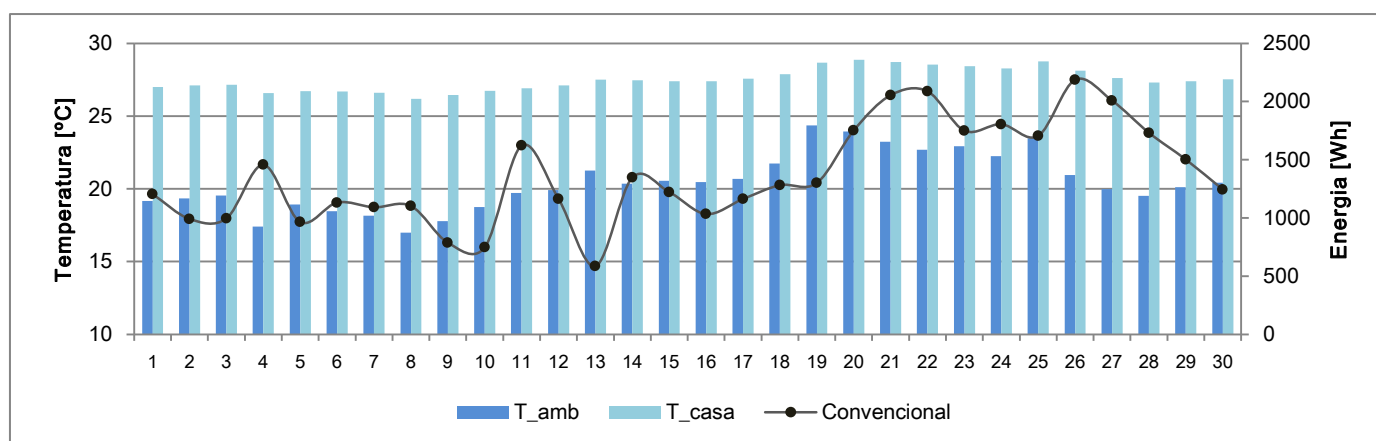


Figura 7.15 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de junho.

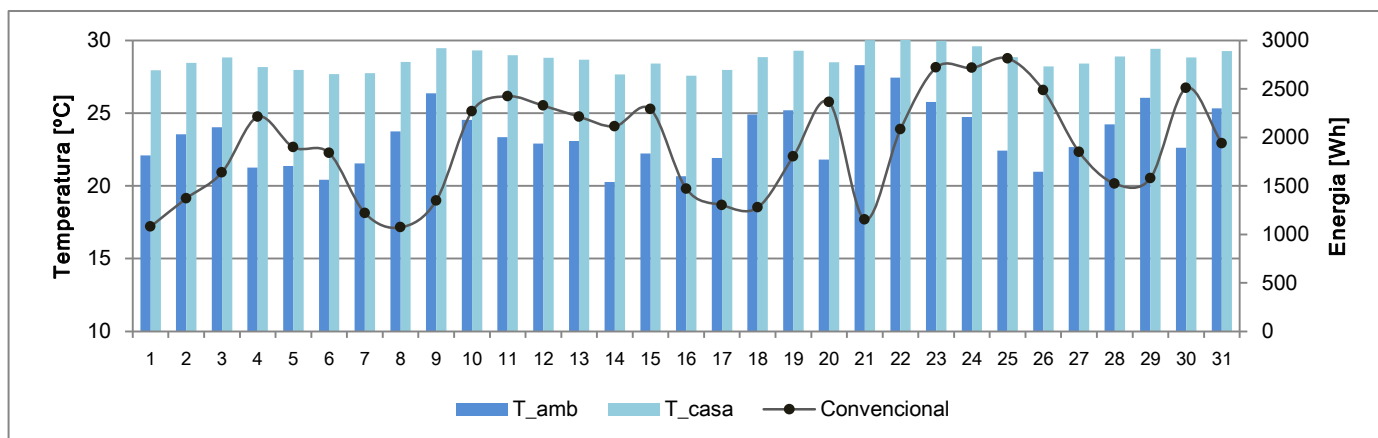


Figura 7.16 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de julho.

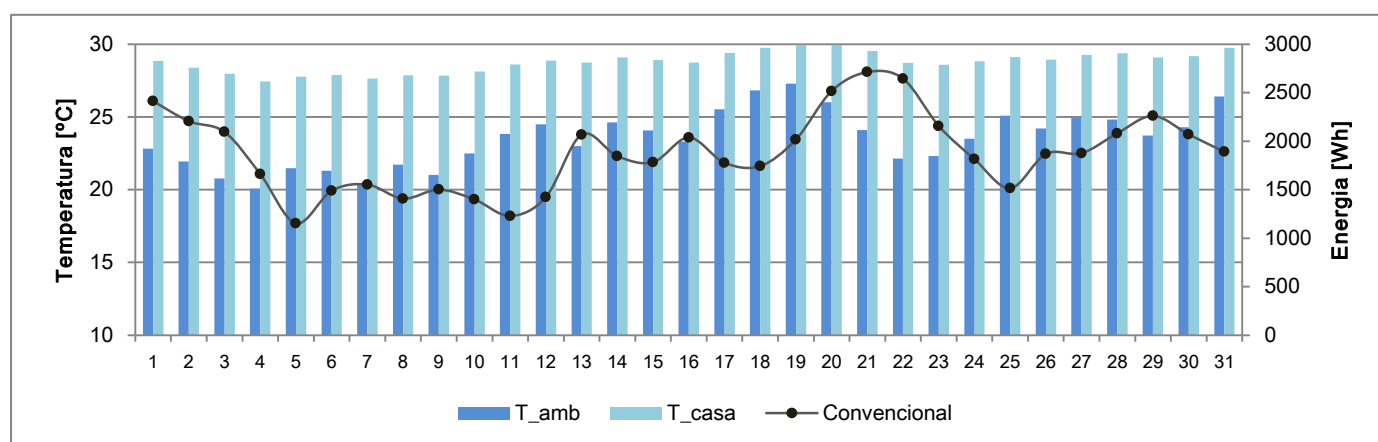


Figura 7.17 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de agosto.

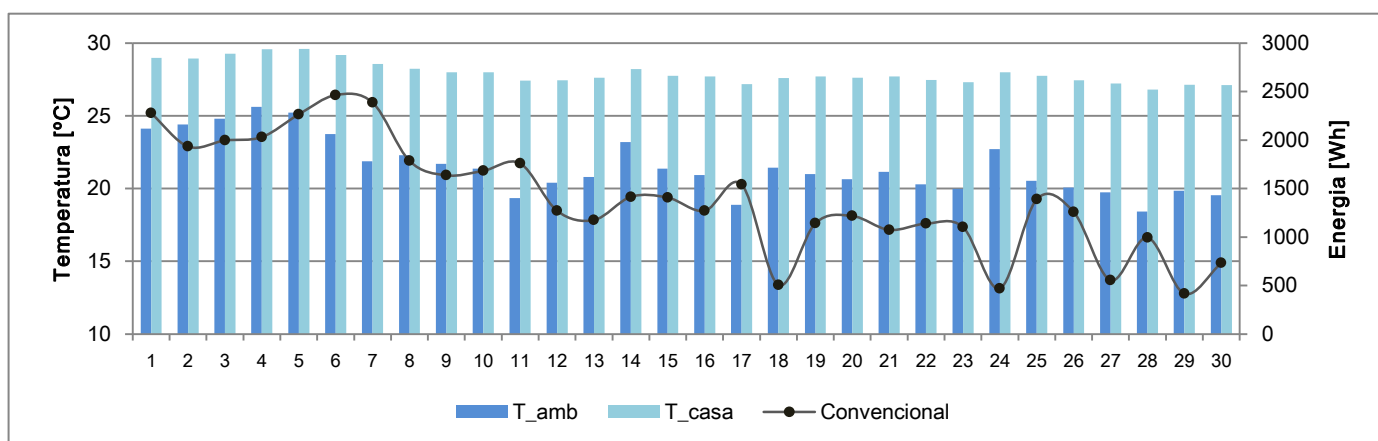


Figura 7.18 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de setembro.

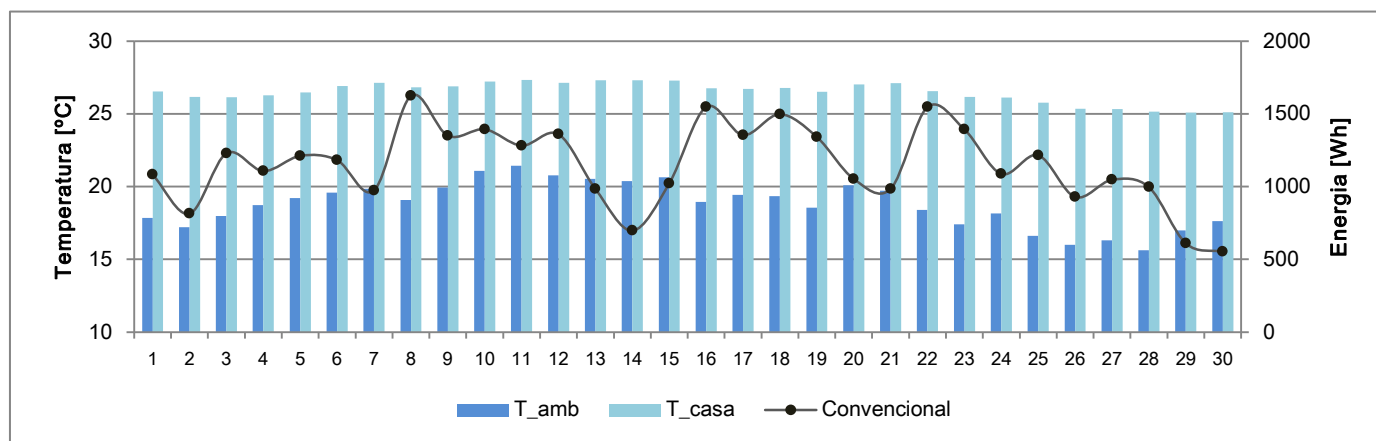


Figura 7.19 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelo sistema durante o mês de outubro.

IX. Otimização

Área útil do elemento dissipativo

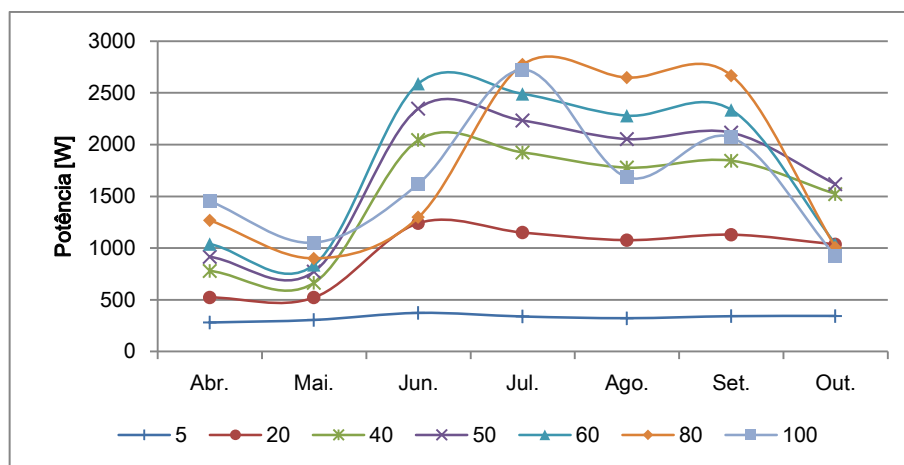


Figura 7.20 – Potência dissipada média mensal pelo elemento radiativo.

Percentagem de glicol no fluido

Tabela 7.14 – Propriedades de água glicolada com diferentes percentagens de glicol. [60]

Percentagem de glicol [%]	Massa específica [kg/m ³]	Condutibilidade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
0 %	1000	0,390	4190
25 %	1030	0,470	3950
38 %	1045	0,425	3720
47 %	1054	0,395	3560

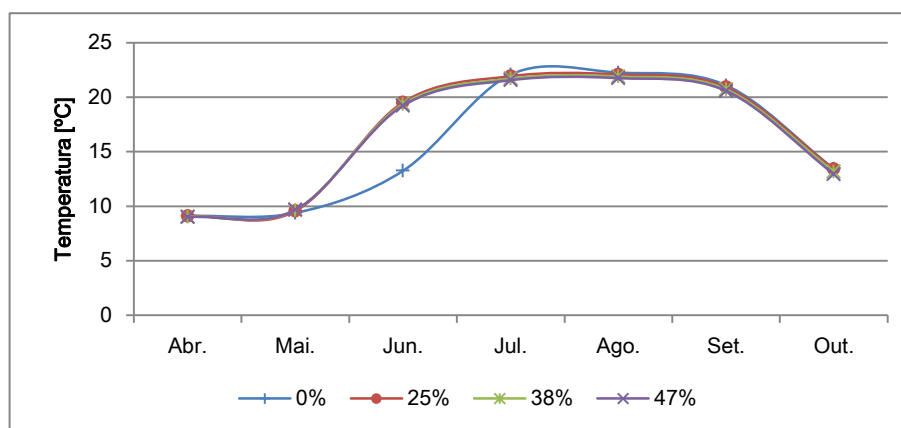


Figura 7.21 – Temperatura média mensal do reservatório no início da noite.

Volume do reservatório

Dimensões do reservatório

Algumas das propriedades do reservatório utilizado na modelação foram apresentadas na Tabela 2.2 página 20.

Para a determinação do diâmetro utilizou-se um valor de catálogo para o volume e altura (5m³ com 1,76m) e aplicou-se a equação (7.17). Este valor será o mesmo para todos os volumes utilizados na otimização.

$$Vol_{res} = \frac{\pi \cdot D_{res}^2}{4} \cdot altura \Leftrightarrow D_{res} = \sqrt{\frac{4 \cdot Vol_{res}}{altura \cdot \pi}} \Leftrightarrow D_{res} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5}{1,76 \cdot \pi}} \Leftrightarrow D_{res} = 1,9 \text{ m} \quad (7.17)$$

Recorrendo à mesma equação calculam-se as alturas dos reservatórios considerados na análise de sensibilidade, através do volume estipulado - Tabela 7.15:

Tabela 7.15 – Volume e altura dos reservatórios.

Volume [m ³]	Altura [m]	Altura entrada [m]
1	0,35	0,25
3	1,06	0,75
4	1,41	1,00
5	1,76	1,25
7	2,47	1,75
10	3,53	2,50

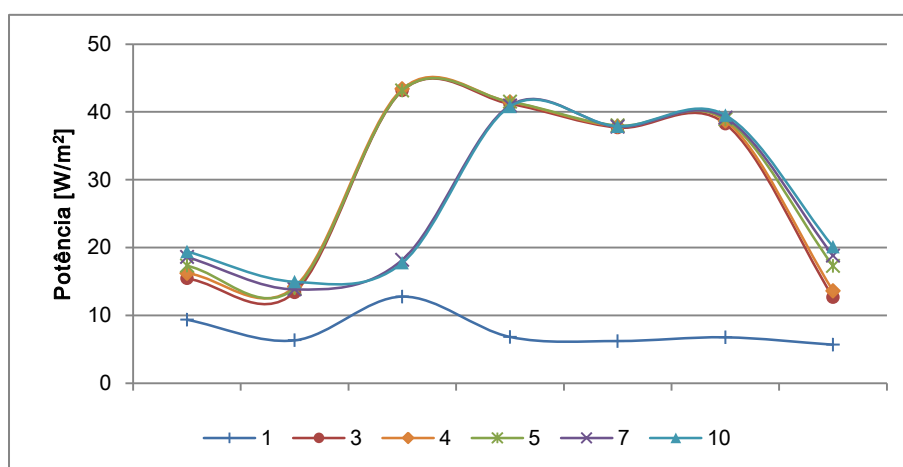


Figura 7.22 – Potência média mensal dissipada por unidade de área.

Efeito convectivo e radiativo

Neste anexo são comparados os resultados com os dados otimizados considerando a transferência de calor como apenas (1) radiativa e (2) radiativo e convectiva. O objetivo é demonstrar que ao considerar o efeito da convecção no interior do edifício, apenas varia o valor absoluto da energia absorvida pelo sistema convencional, sem alterar a variação das curvas.

O modo de transferência de calor no edifício não influencia a temperatura do tanque (Figura 7.23), pois a energia absorvida por este é sempre a mesma, independentemente do modo de transferência. Visto isto, a potência dissipada para o céu é a mesma (Figura 7.24).

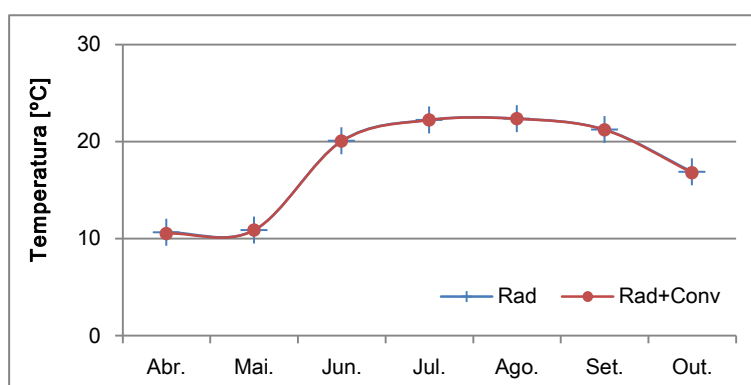


Figura 7.23 – Temperatura média mensal do fluido do reservatório no fim e um dia de trabalho.

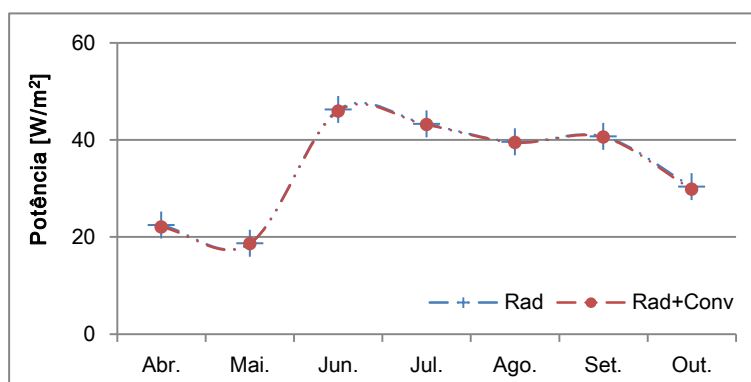


Figura 7.24 – Potência média mensal dissipada pelos coletores PVT por unidade de área.

A única influência que existe quando se considera que 30% da energia é absorvida por convecção, é a redução na necessidade de recorrência ao sistema convencional. Pois, a transferência de calor por convecção permite que o ar arrefeça nesse instante, caso a transferência se realiza-se apenas por radiação esta afetava unicamente a envolvente do radiador, tendo um efeito mais demorado no arrefecimento.

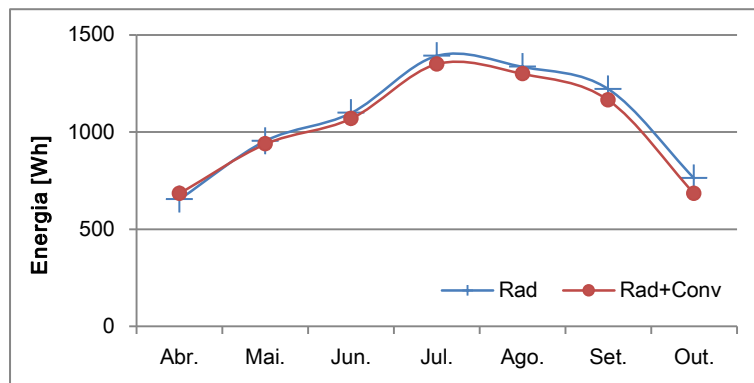


Figura 7.25 – Energia média mensal absorvida pelo sistema convencional.

O efeito da convecção verifica-se na fatura elétrica anual, que reduz 5% do consumo do convencional, e 4% do consumo total - Figura 7.16.

Tabela 7.16 – Energia utilizada pelo sistema convencional e pelas bombas [kWh/ano].

	Consumo elétrico		Consumo Total
	Convencional	Bombas	
Rad	731	265	996
Rad + Conv	<u>697</u>	264	961

X. Sistema otimizado

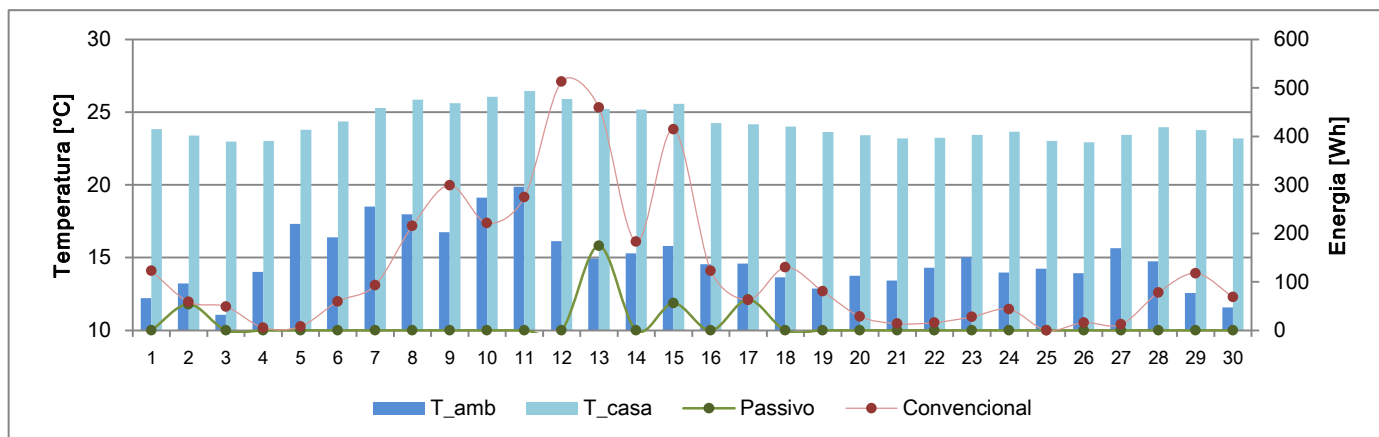


Figura 7.26 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de abril.

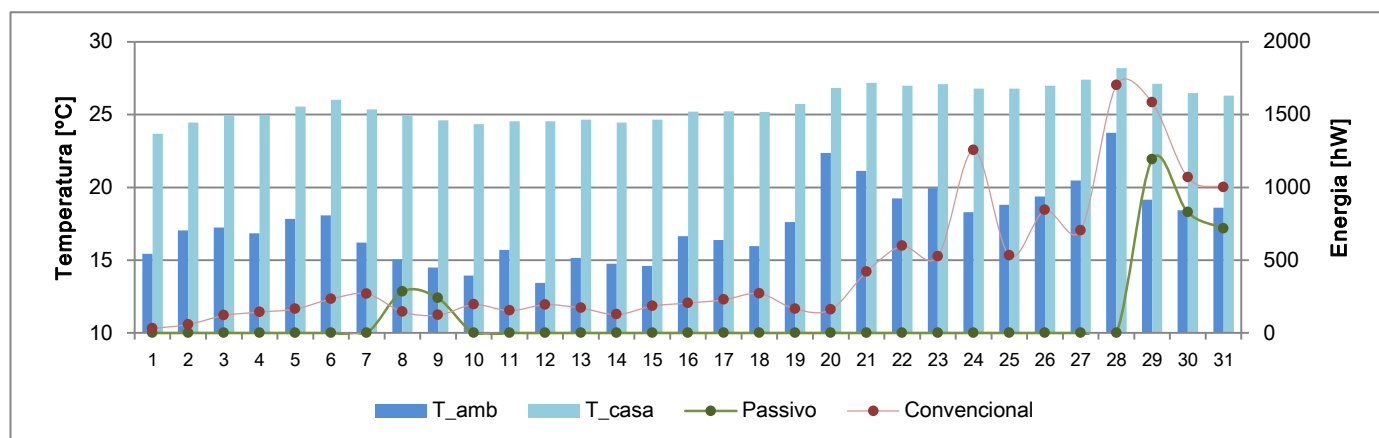


Figura 7.27 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de maio.

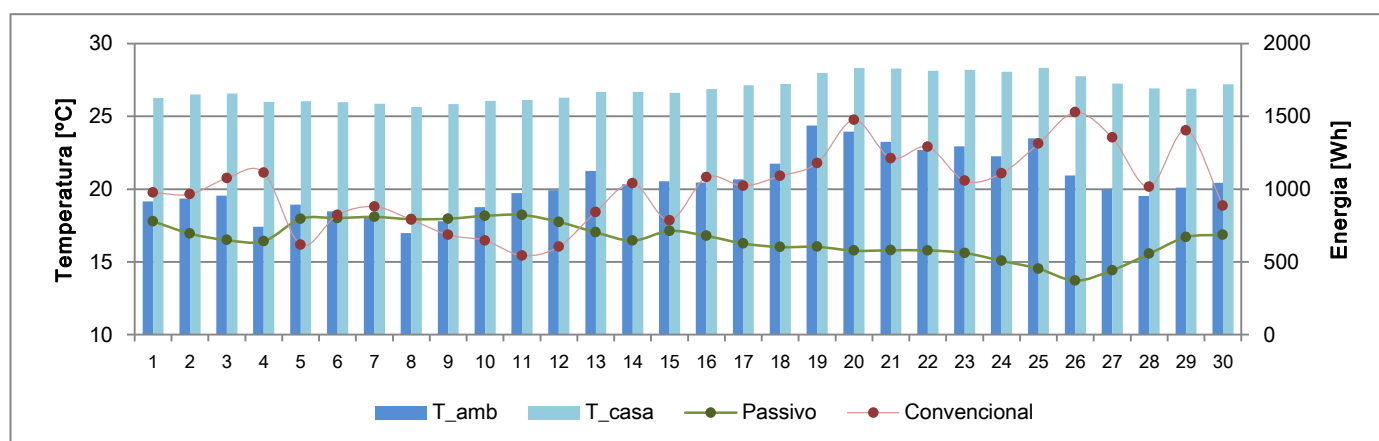


Figura 7.28 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de junho.

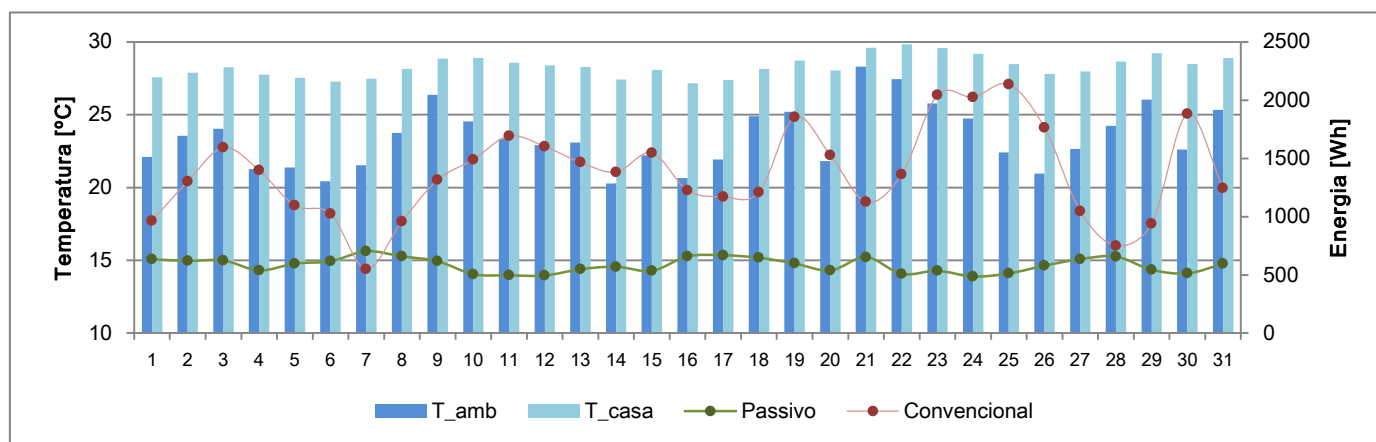


Figura 7.29 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de julho.

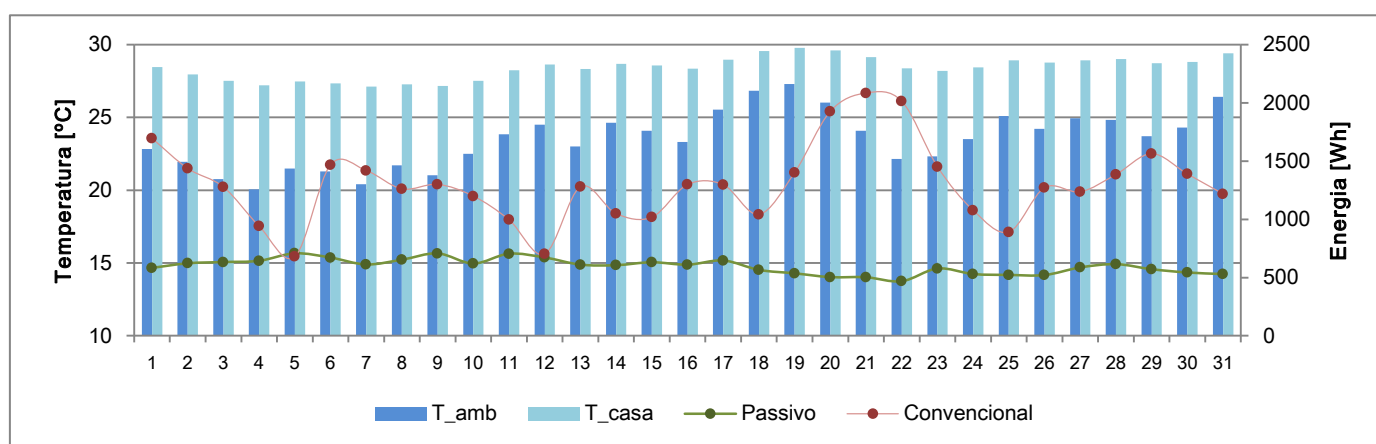


Figura 7.30 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de agosto.

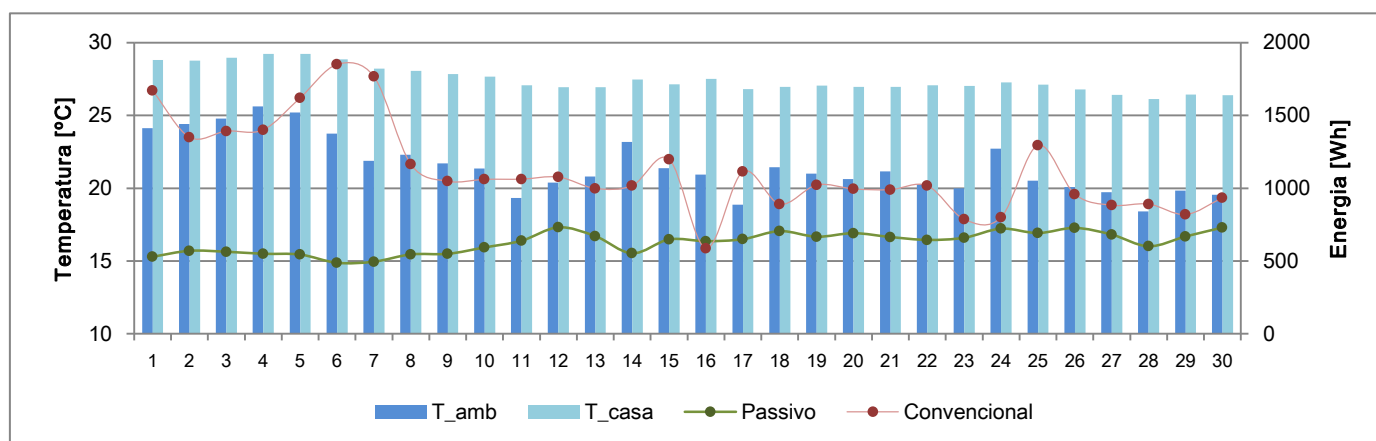


Figura 7.31 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de setembro.

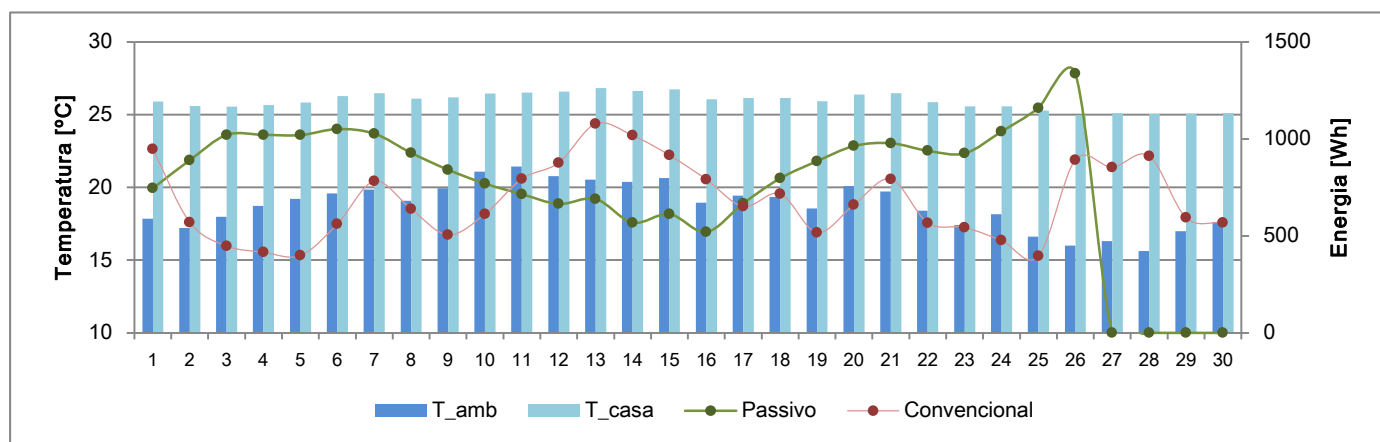


Figura 7.32 – Temperatura média diária ambiente e no interior do edifício, e energia média diária absorvida pelos sistemas durante o mês de outubro.

Área inferior (25 m²)

A Tabela 7.17 representa os parâmetros otimizados para 25 m² de área emissora, estando destacados os valores alterados relativamente aos 60 m². Os diversos consumos elétricos encontram-se representados na Tabela 7.18.

Tabela 7.17 – Parâmetros para a otimização do sistema para 25m².

Parâmetro		Unidades
Área	25	m ²
Caudal	80	kg/h.m ²
Glicol	25	%
Tipo de ligação	Paralelo	-
Inclinação do PVT	37,1	°
Volume	7	m ³
Envolvente do reservatório	Interior	-

Tabela 7.18 – Energia utilizada pelo sistema convencional, pelas bombas e auxiliar de AQS [kWh/ano].

Área emissora [m ²]	Consumo elétrico				Consumo Total
	Convencional	Aquecimento ambiente	Bombas	Auxiliar AQS	
60	697	169	264	159	1289
25	784	169	267	182	1402